

Avaliação do Ciclo de Vida Aplicada à Gestão de Resíduos Urbanos num Município do Brasil

Diogo Appel Colvero^{a,*}, Simone Costa Pfeiffer^b, José Carlos Martins Ramalho^c,
Andreia Alves do Nascimento^b

^a Universidade Federal de Goiás (UFG), Avenida Esperança - Chácara de Recreio Samambaia, Goiânia, Goiás - 74690-900, Brasil

^b Universidade Federal de Goiás (UFG), Avenida Universitária, n.º 1488 - Setor Leste Universitário, Goiânia, Goiás - 74605-220, Brasil

^c Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Avenida Fernando Ferrari, 514, Vitória, Espírito Santo - 29075-910, Brasil

RESUMO

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma técnica que permite quantificar e avaliar os impactos ambientais associados, por exemplo, a um modelo de gestão de resíduos sólidos. O presente estudo propôs-se a identificar os impactos ambientais vinculados à gestão municipal dos resíduos urbanos (RU) para o município de Goiânia, Brasil, a partir de uma ACV. Para isso, solicitou-se à Companhia de Urbanização de Goiânia os quantitativos de RU recolhidos de forma diferenciada e indiferenciada entre os anos de 2016 a 2020, além das quantidades de resíduos enviados para a deposição final no aterro não licenciado da cidade. Para quantificar os impactos ao ambiente relacionados à gestão dos RU foram criados seis cenários, modelados recorrendo à ferramenta *EASETECH*, e avaliadas 12 diferentes categorias de impacto. Os resultados da ACV apontaram que o cenário 2, que contempla um aterro não licenciado, 5,58% dos RU encaminhados à triagem e 94,42% dispostos no aterro, apresentou o pior resultado ambiental dentre os cenários avaliados, com potencial de aquecimento global (*GWP100*) de 111,64 mPE. O melhor resultado foi obtido para o cenário 6, que foi modelado com um aterro licenciado com aproveitamento energético, 12,25% de resíduos enviados para a triagem e 87,75% dispostos no aterro, com *GWP100* de 12,64 mPE.

Palavras-Chave: ACV, resíduos urbanos, impacto ambiental, gestão de resíduos, Brasil

doi: 10.22181/aer.2025.0204

* Autor para correspondência
E-mail: diogocolvero@ufg.br

Life Cycle Assessment Applied to Municipal Solid Waste Management in a Brazilian Municipality

Diogo Appel Colvero^{a,}, Simone Costa Pfeiffer^b, José Carlos Martins Ramalho^c
Andreia Alves do Nascimento^b*

^a Universidade Federal de Goiás (UFG), Avenida Esperança - Chácara de Recreio Samambaia, Goiânia, Goiás - 74690-900, Brasil

^b Universidade Federal de Goiás (UFG), Avenida Universitária, n.º 1488 - Setor Leste Universitário, Goiânia, Goiás - 74605-220, Brasil

^c Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Avenida Fernando Ferrari, 514, Vitória, Espírito Santo - 29075-910, Brasil

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is a technique that allows quantifying and evaluating the environmental impacts associated, for example, with a solid waste management model. The objective was to determine the environmental impact of municipal solid waste management of Goiânia, Brazil. For this purpose, the Goiânia Urbanisation Company was asked about the quantities of commingled and source-separated waste collection and disposal in the city's unlicensed landfill between 2016 and 2020. Six scenarios were modelled using EASETECH LCA software, and 12 impact categories were evaluated. The LCA ranked scenario 2, in which 5.58% of the collected waste is sent to sorting and the remaining 94.42% is disposed of in an unlicensed landfill, as the worst of all, with a global warming potential (GWP100) of 111.64 mPE. In contrast, the scenario 6, with 12.25% of the waste sent to sorting and 87.75% disposed of in a licensed landfill with energy recovery was evaluated as the best, with a GWP100 of 12.64 mPE.

Keywords: LCA, municipal solid waste, environmental impact, waste management, Brazil

doi: 10.22181/aer.2025.0204

* Corresponding author
E-mail: diogocolvero@ufg.br

1 Introdução

A gestão integrada de resíduos sólidos é definida como um conjunto de ações que visam a procura de soluções para o fim de vida dos produtos e materiais, sob a premissa do desenvolvimento sustentável (Brasil, 2010). A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta que permite a quantificação dos impactos ambientais de um processo, produto e/ou serviço (Angili et al. 2021, Clavreul et al., 2014). Avaliação que pode ocorrer em qualquer etapa do ciclo de vida, seja na extração da matéria-prima ou na deposição final, e que visa a otimização ambiental do que está a ser avaliado. Laurent et al. (2013) recomendam aos tomadores de decisão o uso da ACV para modelar os impactos e benefícios ambientais de um sistema de gestão de resíduos urbanos (RU).

Considerando a necessidade de dados atuais que orientem os tomadores de decisão, este estudo propôs-se a identificar, a partir de uma ACV, os impactos ambientais vinculados à gestão municipal dos RU através de um estudo de caso feito no município de Goiânia, Brasil.

2 Materiais e Métodos

2.1 Gestão dos RU em Goiânia, Goiás

O estudo foi desenvolvido no município de Goiânia, capital do estado de Goiás, Brasil. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), Goiânia possuía uma população estimada de 1.536.097 habitantes no ano de 2020.

Para o presente estudo foram solicitados à Companhia de Urbanização de Goiânia - COMURG (2021), responsável pelos serviços de limpeza urbana no município, os quantitativos de resíduos recolhidos pela empresa através das recolhidas diferenciada e indiferenciada entre os anos de 2016 a 2020 (ano de início da pandemia de COVID-19), além dos RU depositados no aterro não licenciado de Goiânia (Quadro 1).

2.2 Evolução dos quantitativos de resíduos entre 2016 e 2020

Com base nos quantitativos de RU recolhidos e dispostos no aterro de Goiânia (Quadro 1), é possível distinguir dois períodos principais: diminuição da recolha e da deposição de RU entre 2016 e 2018 e, a partir deste ano, esta tendência inverte-se, até 2020.

Em relação ao primeiro período (2016-2018), a tendência decrescente é explicada por dois fatores principais: as alterações introduzidas pela Lei municipal n.º 9.498 (Goiânia, 2014) que passa ao grande gerador, antes atendido pela COMURG, a responsabilidade da recolha e deposição final dos seus resíduos, e à crise económica brasileira, iniciada em 2014 e que só teve melhorias a partir de 2018. No segundo período (2019-2020), a economia, e consequentemente o consumo, começa a recuperar-se, mas continua afetada pela pandemia de COVID-19. Em 2020, a COMURG solicitou à população que, se houvesse algum morador infetado com COVID-19 na residência, não separasse os seus recicláveis.

Quadro 1. Resíduos da coleta diferenciada, indiferenciada e dispostos no aterro de Goiânia entre os anos de 2016 e 2020

RU coleta diferenciada					
	2016	2017	2018	2019	2020
Total (t)	29.736,62	29.247,63	24.221,45	27.177,12	25.123,46
Média mensal (t·mês⁻¹)	2.478,05	2.437,30	2.018,45	2.264,76	2.093,62
Média diária (t·dia⁻¹)	81,47	80,13	66,36	74,46	68,83
Per Capita (kg·hab⁻¹·dia⁻¹)	0,056	0,055	0,044	0,049	0,045
Variação		-2,82%	-18,82%	10,69%	-8,76%
Porcentagem recolhida (%)	6,25	6,50	5,44	6,13	5,58
RU coleta indiferenciada					
Total (t)	445.883,75	420.509,54	421.326,96	416.253,03	425.467,15
Média mensal (t·mês⁻¹)	37.156,98	35.042,46	35.110,58	34.687,75	35.455,60
Média diária (t·dia⁻¹)	1.221,60	1.152,08	1.154,32	1.140,42	1.165,66
Per Capita (kg·hab⁻¹·dia⁻¹)	0,84	0,79	0,77	0,75	0,76
Variação		-6,81%	-1,79%	-2,53%	0,88%
Porcentagem recolhida (%)	93,75	93,50	94,56	93,87	94,42
RU aterro não licenciado de Goiânia					
Total (t)	484.371,88	485.657,81	473.365,84	514.460,01	628.346,15
Média mensal (t·mês⁻¹)	40.364,32	40.471,48	39.447,15	42.871,67	52.362,18
Média diária (t·dia⁻¹)	1.327,05	1.330,57	1.296,89	1.409,48	1.721,50
Per Capita (kg·hab⁻¹·dia⁻¹)	0,92	0,91	0,87	0,93	1,12
Variação		-0,93%	-4,46%	7,22%	20,55%
População (hab.)*	1.448.639	1.466.105	1.495.705	1.516.113	1.536.097

* População estimada (IBGE, 2021).

Destaca-se ainda que o aterro de Goiânia recebe os resíduos domiciliares e os públicos recolhidos pela COMURG (2021), além dos recolhidos por empresas privadas em grandes geradores. Segundo SEMAD/GO e AGR (2021), o aterro municipal de Goiânia não está licenciado.

2.3 Base de dados para a avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Dados para a ACV dos RU de Goiânia, Brasil

A ACV é um método que permite identificar os impactos ambientais de um modelo de gestão (Hauschild e Huijbregts, 2015). Conforme Cheela et al. (2021), a ACV permite a comparação entre diferentes propostas de sistemas de tratamento de RU.

A modelagem foi feita com o *software EASETECH*, versão 2.5.7, desenvolvido pela *Technical University of Denmark – DTU*, que realiza ACV especificamente para resíduos (Clavreul et al., 2014). Seguindo a metodologia de Saraiva et al. (2017), definiu-se como unidade funcional (UF) a gestão de 1 t de RU, contabilizando desde a geração dos resíduos até à sua deposição final. A identificação do fluxo de referência é necessária para a definição das saídas dos processos dentro da ACV, assim como para ilustrar as fronteiras dos sistemas propostos (Angili et al., 2021). O fluxo de referência são os RU de Goiânia, que são os resíduos gerados nas residências, os dos serviços de limpeza urbana e os equiparados aos resíduos domiciliares (Brasil, 2010).

Para Saraiva et al. (2017), uma das etapas de uma ACV é a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), que visa analisar a significância ambiental dos resultados do inventário do ciclo de vida (ICV). Assim, a AICV foi realizada para 12 categorias de impacto, e usados os métodos recomendados pela International Reference Life Cycle Data System – ILCD (2011). Os resultados foram normalizados de acordo com fatores universais para a extração de recursos e para as emissões aplicados por DTU (2016) e Sala et al. (2017).

2.4 Inventário do Ciclo de Vida (ICV) das tecnologias de tratamento de RU

Composição gravimétrica e geração de resíduos urbanos

A composição gravimétrica dos RU de Goiânia é de 52,65% de resíduos orgânicos, 28,19% de resíduos recicláveis secos e 19,16% de rejeitos (Goiânia, 2021). Contudo, para fazer uma modelagem no *software EASETECH*, foi necessária uma caracterização mais detalhada, com 25 diferentes tipos de resíduos. Para isso, utilizou-se a composição gravimétrica dos RU no Brasil, conforme Lima et al. (2018), adaptando-a para os resíduos de Goiânia (Quadro 2).

Quadro 2. Composição gravimétrica dos RU em Goiânia, Brasil. Fonte: Adaptado de Lima et al. (2018) e Goiânia (2021)

Caracterização dos RU gerados no município de Goiânia	Composição gravimétrica média (%)	Caracterização dos RU gerados no município de Goiânia	Composição gravimétrica média (%)
Papel		Plástico	
Papel (papel de escritório)	3,04	Plástico macio (sacos plásticos)	8,33
Papel de cozinha (outro papel)	0,24	Esferovite (não reciclável)	0,75
Revista	0,06	Outro plástico (produtos plásticos)	1,56
Jornal	0,24	Resíduos Orgânicos	
Papelão	3,11	Origem vegetal	46,33
Embalagens Tetrapak	1,41	Origem animal	6,32
Metal		Rejeitos	
Metal ferroso	1,22	Higiênico (fraldas, lenços umedecidos)	2,59
Metal não ferroso (alumínio)	0,14	Borracha	0,47
Vidro		Couro	0,39
Vidro transparente (sem cor)	2,54	Espuma (outros combustíveis)	0,17
Vidro colorido	0,51	Têxtil	4,27
Plástico		Madeira (resíduos de madeira)	0,68
Plástico rígido	4,27	Outro (não combustíveis)	10,37
PET (garrafas plásticas)	0,77	Resíduos Perigosos (pilhas, baterias)	0,22

ICV do sistema de recolha e transporte de RU

Para a modelagem da ACV foi necessário definir os consumos de combustível para a recolha e o transporte de RU. Segundo Larsen et al. (2009), para a recolha deve-se considerar os consumos em litros de diesel por tonelada de resíduo recolhido ($L \cdot t^{-1}$). Para a recolha indiferenciada de RU considerou-se um consumo de $3 L \cdot t^{-1}$, e para a recolha diferenciada de recicláveis secos o consumo adotado foi de $6 L \cdot t^{-1}$ (Bassi et al., 2017).

Como o *EASETECH* calcula os consumos de combustível em litros de diesel por tonelada de RU recolhido e por km percorrido ($L \cdot t^{-1} \cdot km^{-1}$), para o transporte dos diferentes tipos de resíduos recicláveis secos foram consideradas as distâncias médias de transporte usadas no estudo de Vergara et al. (2016), que variaram de 200 a 400 km, considerando percurso de ida e volta. Para o transporte dos RU da recolha indiferenciada e dos rejeitos das centrais de triagem, tal qual Colvero et al. (2019), considerou-se o deslocamento do centro urbano de Goiânia até ao aterro da cidade, que para Goiânia é de 13,8 km (que terá uma distância total de 27,6 km, pois o percurso é de ida e volta).

ICV da triagem de materiais potencialmente recicláveis seco

Para modelagem da triagem de materiais potencialmente recicláveis secos, tal como no estudo de Cimpan et al. (2015, 2016), estimou-se o consumo de eletricidade de $15 kWh \cdot t^{-1}$ e de $0,85 kg \cdot t^{-1}$ de fios para os fardos de materiais que serão enviados para a reciclagem. Como no estudo de Carvalho e Cena (2019), considerou-se uma eficiência média de 70% para as centrais de triagem de Goiânia.

ICV do aterro

Para modelar o aterro considerou-se Goiânia com clima tropical, com um índice pluviométrico médio anual de 1.500 mm e com temperaturas anuais médias de 23,4 °C (Cardoso et al., 2014). Estes dados estão ligados à taxa de decomposição dos resíduos orgânicos existentes nos RU e, portanto, à produção de gás metano (Olesen e Damgaard, 2014). O clima em Goiânia e o tipo de aterro serviram para definir as taxas de decaimento de 1ª ordem (k) e a produção do gás de aterro (Colvero et al., 2022). Para um aterro não licenciado considera-se um valor de k de 0,8 e num aterro licenciado este valor é de 1 (ABRELPE, 2013). Estes valores são inseridos no *EASETECH* aquando da modelação das infraestruturas de deposição final.

2.5 O cenário atual e a proposição de cenários alternativos

De acordo com os dados obtidos, no período 2016-2020 houve uma redução da percentagem de resíduos da recolha diferenciada em relação à recolha indiferenciada e também uma diminuição do valor global da recolha diferenciada (ver Quadro 1).

Assim, a partir das percentagens de RU desviados pela recolha diferenciada e da situação do aterro de Goiânia em 2022 (não licenciado), propõem-se seis cenários diferentes para a ACV. Os cenários 1 e 2 representam, respetivamente, as tecnologias de tratamento de RU de Goiânia nos anos de 2016 e 2020. Estes cenários foram assim definidos pois são o *status quo* da gestão de RU em Goiânia, e serviu de ponto de partida do presente estudo. Nos cenários 3 e 4, alterou-se a deposição final e nos cenários 5 e 6 foi alterada, ainda, a percentagem da recolha diferenciada (Quadro 3 e Figura 1). A opção por aterro licenciado com *queimador* (cenários 3 e 5) e de aterro com aproveitamento energético (cenários 4 e 6), ocorreram porque, assim como no estudo de Lima et al. (2018), correspondem a alternativas à deposição final inadequada. Já o aumento na percentagem da recolha diferenciada (cenários 5 e 6) ocorreu porque, de acordo com Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES (MMA, 2012), os municípios brasileiros precisam ter metas de desvios do aterro de materiais potencialmente recicláveis (Quadro 3, Figura 1).

Quadro 3. Cenários da modelagem a partir de uma avaliação do ciclo de vida

Cenário	Descrição do cenário
Cenário 1: 2016, aterro não licenciado	Dos RU produzidos em 2016: 6,25% vão para triagem e; 93,75% vão para o aterro não licenciado de Goiânia.
Cenário 2: 2020, aterro não licenciado	Dos RU produzidos em 2020: 5,58% vão para triagem e; 94,42% vão para o aterro não licenciado de Goiânia.
Cenário 3: 2020, aterro licenciado com queimador	Dos RU produzidos em 2020: 5,58% vão para triagem e; 94,42% vão para um aterro licenciado com queimador.
Cenário 4: 2020, aterro licenciado com aproveitamento energético	Dos RU produzidos em 2020: 5,58% vão para triagem e; 94,42% vão para um aterro licenciado com aproveitamento energético.
Cenário 5: 2022, aterro licenciado com queimador	Dos RU produzidos em 2022: 12,25% vão para triagem e; 87,75% vão para um aterro licenciado com queimador.
Cenário 6: 2022, aterro licenciado com aproveitamento energético	Dos RU produzidos em 2022: 12,25% vão para triagem e; 87,75% vão para um aterro licenciado com aproveitamento energético.

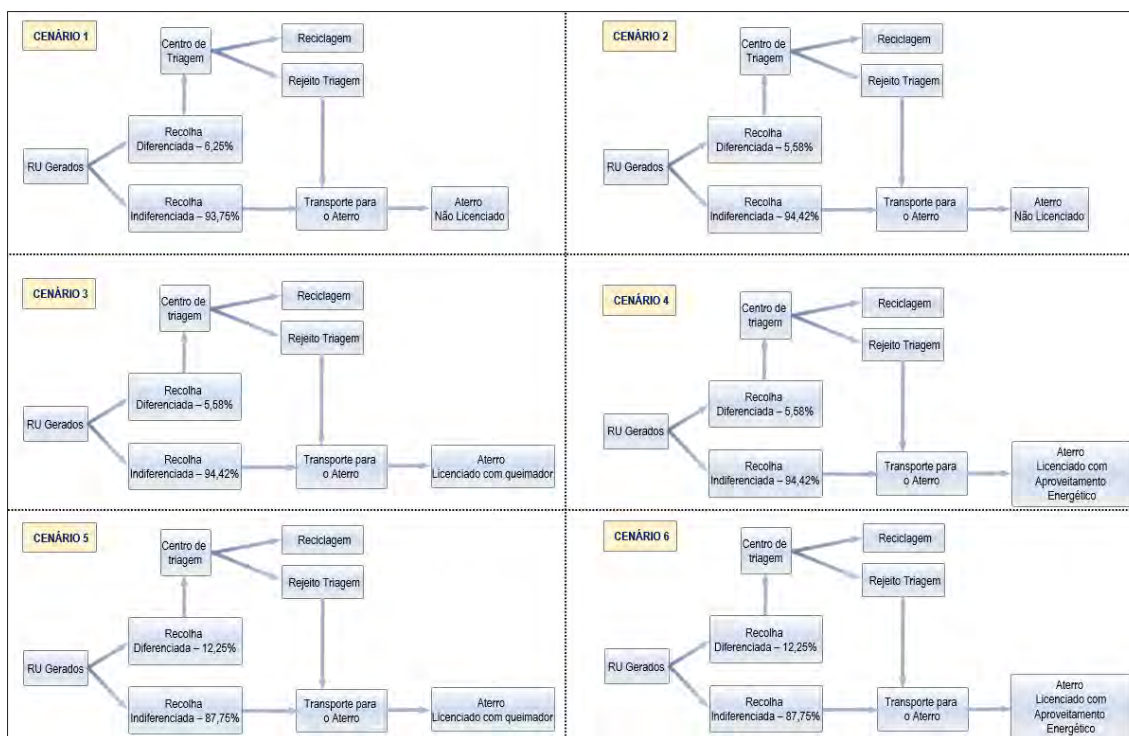


Figura 1. Os seis cenários que foram modelados no software EASETECH

3 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos com recurso à avaliação do ciclo de vida (ACV) para os seis diferentes cenários são discutidos a seguir.

3.1 ACV da gestão dos RU de Goiânia

Os seis cenários avaliados neste estudo (ver Quadro 4) tiveram como questões centrais dois aspetos: diferentes percentagens de RU desviados para a recolha diferenciada e uma deposição final com três possibilidades: o atual aterro de Goiânia, não licenciado; um aterro licenciado com queimador e; um aterro licenciado com aproveitamento energético.

De acordo com levantamento realizado neste estudo, no ano de 2016 em torno de 93,7% dos RU gerados em Goiânia foram recolhidos de forma convencional, tendo como destino o aterro não licenciado da cidade, e 6,3% foram recolhidos de forma diferenciada e enviados para as centrais de triagem do município. Já em 2020, durante a pandemia da COVID-19, a percentagem de resíduos recolhidos de forma diferenciada caiu para 5,6%, e os demais 94,4% foram recolhidos pela recolha convencional. Diante desta situação, criou-se um terceiro cenário que, a partir de 2016, ocorreria um acréscimo anual de 1% no desvio de resíduos sólidos para a recolha diferenciada. Este aumento gradual e constante na recolha diferenciada representaria passar do desvio de 6,25% em 2016 para 12,25% em 2022.

Com as estimativas da composição gravimétrica e com os desvios propostos para os anos de 2016, 2020 e 2022, identificaram-se as percentagens de RU que vão para as centrais de triagem e para o aterro em cada um destes três anos. Estas percentagens foram essenciais para que os cálculos dos impactos ambientais no EASETECH. Dos quantitativos que chegam à triagem, 70% vão para a reciclagem e os 30% restantes são enviados ao aterro.

Os valores líquidos representam a soma dos impactos e dos benefícios sobre o ambiente. Assim como Lima et al. (2018), os valores positivos são os impactos e os valores negativos retratam as

economias ambientais. Foram avaliadas 12 categorias de impacto: potencial de aquecimento global – *GWP100*, potencial de destruição da camada de ozono – *ODP*, toxicidade humana, efeitos cancerígenos – *HT-CE*, toxicidade humana, efeitos não cancerígenos – *HT-non CE*, formação de oxidantes fotoquímicos – *POF*, material particulado – *PM*, acidificação terrestre – *TAD*, eutrofização da água doce – *EPF*, eutrofização terrestre – *EPT*, eutrofização marinha – *EPM*, ecotoxicidade da água doce – *ECF* e destruição de recursos abióticos, minerais, fósseis e renováveis – *DAMR*.

Os resultados líquidos normalizados, em miliequivalentes por pessoa (mPE) e apresentados no Quadro 4, têm destaques a **bold** e sombreados a cinza, para os melhores desempenhos ambientais, e a **bold** para identificar os piores desempenhos ao ambiente, para cada categoria de impacto avaliada. Além de comparações entre diferentes cenários dentro da mesma categoria, a normalização permite também comparar resultados em diferentes categorias de impacto (Lima et al. 2018). Sendo que, os fatores universais de normalização utilizados no presente estudo foram os mesmos adotados por DTU (2016), que é a criadora do *software* *EASETECH*, ferramenta empregada para a ACV.

Quadro 4. Valores líquidos normalizados, em miliequivalentes de pessoa – mPE, para as 12 categorias de impacto avaliadas, em seis diferentes cenários

Categoria de impacto	Cenários					
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
<i>GWP100</i>	110,74	111,64	21,17	16,26	16,84	12,14
<i>ODP</i>	28,64	29,06	11,07	11,94	7,54	8,37
<i>HT-CE</i>	25,63	27,03	-1,79	-3,77	-14,62	-16,52
<i>HT-non CE</i>	23,43	24,11	14,92	13,28	9,16	7,51
<i>PM</i>	-5,30	-4,50	-4,05	-3,82	-12,00	-11,81
<i>POF</i>	10,88	11,28	5,90	12,58	2,44	8,75
<i>TAD</i>	-2,28	-1,85	-0,84	2,42	-5,16	-2,08
<i>EPT</i>	0,52	0,77	1,74	8,33	-0,52	5,71
<i>EPF</i>	0,75	0,95	0,42	0,30	-1,57	-1,68
<i>EPM</i>	45,88	46,23	2,31	6,07	1,17	4,72
<i>ECF</i>	19.083,31	19.330,18	6.124,37	4.838,26	4.288,93	3.061,96
<i>DAMR</i>	-7,71	-6,87	-6,88	-6,91	-15,46	-15,51
TOTAL	19.314,49	19.568,03	6.168,36	4.894,94	4.276,75	3.061,56

Legenda: *GWP100*: potencial de aquecimento global; *ODP*: potencial de destruição da camada de ozono; *HT-CE*: toxicidade humana, efeitos cancerígenos; *HT-non CE*: toxicidade humana, efeitos não cancerígenos; *PM*: material particulado; *POF*: formação de oxidantes fotoquímicos; *TAD*: acidificação terrestre; *EPT*: eutrofização terrestre; *EPF*: eutrofização da água doce; *EPM*: eutrofização marinha; *ECF*: ecotoxicidade da água doce; *DAMR*: destruição de recursos abióticos, minerais, fósseis e renováveis. **Cenário 1:** ano de 2016, aterro não licenciado; **Cenário 2:** ano de 2020, aterro não licenciado; **Cenário 3:** ano de 2020, aterro licenciado com queimador; **Cenário 4:** ano de 2020, aterro licenciado com aproveitamento energético; **Cenário 5:** ano de 2022, aterro licenciado com queimador; **Cenário 6:** ano de 2022 aterro licenciado com aproveitamento energético.

Os resultados evidenciam que um cenário com um aterro não licenciado e menor desvio de resíduos do aterro promove maiores impactos sobre o ambiente. É o que se observa no cenário 2, que apresentou maiores emissões ambientais em oito das 12 categorias de impacto avaliadas. Em contrapartida, as maiores economias ambientais foram obtidas nos cenários 5 e 6 que, curiosamente, tiveram o melhor resultado ambiental em seis categorias diferentes cada. Este resultado indica que o que realmente traz as economias mais relevantes ao ambiente é a conjunção de um aterro licenciado com maiores percentagens de resíduos encaminhados para a reciclagem.

Observou-se ainda, que a reciclagem é uma tecnologia que promove relevantes economias ambientais. Dado que está em alinhamento com estudo de Magnago, Oliveira e Guisso (2024), que destacam que a reciclagem é um processo que minimiza os impactos ambientais, já que reduz a extração de matérias-primas. Na categoria de impacto *HT-CE* houve uma mudança, em que os valores líquidos deixam de ser positivos quando se tem modelo de gestão com um aterro não licenciado e com desvios do aterro de 6,25% e 5,6% (cenários 1 e 2), para valores líquidos negativos quando se aumentam os desvios para 12,25% (cenários 5 e 6), independentemente do aterro ser com queimador ou com aproveitamento energético. Já na categoria de impacto *PM*, o fato de aumentar as percentagens de resíduos encaminhados para a recolha diferenciada (cenários 5 e 6) representou uma redução nas emissões ambientais da ordem de 226% (comparando-se os cenários 1 e 5) e de 267% (comparando-se o cenário 2 com o 5).

Assim como aponta o estudo de Ibáñez-Forés et al. (2017), o acréscimo nas percentagens de resíduos a serem enviados para as centrais de triagem, aumentaram os impactos ambientais relacionados com a recolha e transporte. Contudo, assim como Coelho e Lange (2016), o aumento nos impactos ambientais provenientes da recolha, do transporte e da triagem, é muito menor que as emissões caso estes mesmos resíduos tivessem sido enviados para os aterros.

Outra análise que pode ajudar os tomadores de decisão do município é a avaliação do somatório de todas as categorias de impacto. A soma dos resultados líquidos normalizados apresentados no Quadro 6 indica que o cenário 2 (com o menor desvio de resíduos potencialmente recicláveis e um aterro não licenciado), é o que apresentou pior resultado ambiental. Já o cenário 6 (que tem um aterro licenciado com aproveitamento energético e conta com 12,25% de resíduos desviados pela recolha diferenciada de materiais recicláveis), é o que apresentou o menor somatório do resultado líquido normalizado (ou seja, promove menores impactos ambientais). Estes dados estão alinhados com o estudo de Lima et al. (2018) e de Nabavi-Pelesaraei et al. (2017), que apontem que, o aumento do desvio de recicláveis, aliado à construção de um aterro, em detrimento à uma lixeira, melhora os resultados ambientais.

Além disso, somente a troca de um aterro não licenciado para um aterro licenciado reduz entre 68,5% (cenário 3) e 75% (cenário 4) os impactos ambientais em comparação com o cenário 2. Destaca-se, ainda, que a estratégia de aumentar gradativamente a percentagem de resíduos potencialmente recicláveis desviados do aterro torna os resultados ambientais ainda melhores. Pode-se constatar isso ao comparar o cenário 6 com o cenário 2, em que a redução do somatório dos resultados líquidos normalizados foi superior a 84% (ver Quadro 4).

4 Conclusões

A responsabilização dos grandes geradores quanto à gestão dos seus resíduos por meio de legislações municipais decorrentes da Política Nacional de Resíduos Sólidos foi o principal motivo para as variações observadas nos quantitativos recolhidos no município de Goiânia entre os anos de 2016 a 2019.

No ano de 2020, a redução dos resíduos desviados do aterro pela recolha diferenciada foi um reflexo do cenário pandêmico e gerou impactos ao ambiente. A redução de 0,67% nos resíduos recolhidos de forma diferenciada em 2020 (em comparação a 2016) resultou num aumento de 1,3% nas emissões totais (fruto da redução da reciclagem desses resíduos).

Dos seis cenários modelados, aqueles que contam com um aterro licenciado chegam a reduzir em até 75% as emissões ambientais. Aliado a uma deposição final adequada, um acréscimo anual de 1% na recolha diferenciada de resíduos potencialmente recicláveis entre 2016 e 2020, reduziria em mais de 84% as emissões ambientais.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada por FURNAS Centrais Elétricas e Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) da ANEEL, outorga número ANEEL PD-00394-1906/2019.

Referências

- Angili T. S., Grzesik K., Rödl A., Kaltschmitt M. (2021). Life Cycle Assessment of Bioethanol Production: A Review of Feedstock, Technology and Methodology. *Energies*, 14, 2939.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2013). *Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos*.
- Bassi S. A., Christensen T. H., Damgaard A. (2017). Environmental performance of household waste management in Europe - an example of 7 countries. *Technical University of Denmark*.
- Brasil. (2010). Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. Brasília, DF, Brasil: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Retrieved from http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm
- Cardoso M. R. D., Marcuzzo F. F. N., Barros J. R. (2014). Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. *ACTA Geografia*, 8(16), 40–55.
- Carvalho E. H. de, Cena I. S. (2019). Estudo da Ecoeficiência de Centrais de Triagem no Município de Goiânia-Goiás. *30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- Cheela V. R. S., John M., Biswas W. K., Dubey B. (2021). Environmental Impact Evaluation of Current Municipal Solid Waste Treatments in India Using Life Cycle Assessment. *Energies* 14, 3133.
- Cimpan C., Maul A., Jansen M., Pretz T., Wenzel H. (2015). Central sorting and recovery of MSW recyclable materials: A review of technological state-of-the-art, cases, practice and implications for materials recycling. *Journal of Environmental Management*, 156, 181–199.
- Cimpan C., Maul A., Wenzel H., Pretz T. (2016). Techno-economic assessment of central sorting at material recovery facilities - The case of lightweight packaging waste. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4387–4397.
- Clavreul J., Baumeister H., Christensen T. H. Damgaard A. (2014). An environmental assessment system for environmental technologies. *Environmental Modelling & Software*, 60, 18–30.
- Coelho L. M. G., Lange L. C. (2016). Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 13 p., 0921-3449.
- Colvero D. A., Ramalho J. C. M., Gomes A. P. D., Matos M. A. A. D., Tarelho L. A. (2022). Life cycle assessment of shared municipal solid waste management facilities in a metropolitan region. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, v. 48, p. 329-352.
- Colvero D. A., Gomes A. P. D., Tarelho L. A. Da C., Matos M. A. A. De, Ramalho J. C. M. (2019). Proposal of an integrated municipal solid waste management facilities for small municipalities. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*. Volume 45, Number 3, pp. 273-286(14).
- COMURG – Companhia de Urbanização de Goiânia. (2021) Aterro sanitário de Goiânia. Goiânia, GO, Brasil.
- DTU – TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK. (2016). *EASETECH Impact categories and impact methods*. Kgs. Lyngby, Denmark. Personal Communication with Dr. Anders Damgaard. *Technical University of Denmark*.
- Goiânia. (2014). Secretaria Municipal da Casa Civil. Lei n.º 9.498, de 19 de novembro de 2014. Dispõe sobre a cobrança de preço público decorrente da prestação de serviços de recolha, transporte e destinação final de resíduos sólidos produzidos por grandes geradores e dá outras providências.

Retrieved from
https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2014/lo_20141119_000009498.htm#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20cobran%C3%A7a%20de,geradores%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias

- Goiânia. (2021). *Prefeitura Municipal*. Plano de coleta seletiva de Goiânia - produto 4. Goiânia, 2021.
- Hauschild M.Z., Huijbregts M.A.J. (2015). Introducing life cycle impact assessment. In: Life cycle impact assessment. *Springer*, pp 1–16.
- Ibáñez-Forés, V., Bovea, M. D., Coutinho-Nóbrega, C., de Medeiros-García, H. R., & Barreto-Lins, R. (2017). Temporal evolution of the environmental performance of implementing selective collection in municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study. *Waste Management*, 72, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.027>
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2021). *Estimativas da População*.
- ILCD – INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM. (2011). Handbook: recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. *Office of the European Union*. Luxembourg.
- Larsen A. W., Vrgoc M., Christensen T. H., Lieberknecht P. (2009). Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance. *Waste Manag Res*, 27(7), 652–659.
- Laurent A., Bakas I., Clavreul J., Bernstad A., Niero M., Gentil E., Christensen T. H. (2013). Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I. *Waste Management*, 34(3), 573–588.
- Lima P. M., Colvero D. A., Gomes A. P. D., Wenzel H., Schalch V., Cimpan C. (2018). Environmental assessment of existing and alternative options for management of municipal solid waste in Brazil. *Waste Management* 78:857–870.
- Magnago, J. S. D. P., Oliveira, J., Guisso, L. F. (2024). O processo de reciclagem de resíduos sólidos no município de São Mateus-ES: impactos socioeconômicos e ambientais. *Revista Contemporânea*, v. 4, n.º 12, p. 01 – 21, ISSN: 2447-0961. DOI: <https://doi.org/10.56083/RCV4N12-242>.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. (2012). Plano Nacional de Resíduos Sólidos - PLANARES. Brasil.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Bayat, R., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Afrasyabi, H., & Chau, K.-W. (2017). Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management - A case study in Tehran Metropolis of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 148, 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.172>
- Olesen, O. U., Damgaard, A. (2014). Landfilling in EASETECH - Data collection and modelling of the landfill modules in EASETECH. *Technical University of Denmark*.
- Sala S., Crenna E., Secchi M., Pant R. (2017). *Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment*. 2017.
- Saraiva A. B., Souza R. G., Valle R. A. B. (2017). Comparative lifecycle assessment of alternatives for waste management in Rio de Janeiro – Investigating the influence of an attributional or consequential approach. *Waste Management*, 68, 701 – 710.
- SEMAD/GO – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, AGR – Agência Goiana de Regulação, Controle e Fiscalização de Serviços Públicos. (2021). *Nota Técnica – Proposta de Regionalização dos serviços de Água, Esgoto e Resíduos Sólidos*. Goiânia/GO, 51 p.
- Vergara S. E., Damgaard A., Gomez D. (2016). The Efficiency of Informality: Quantifying Greenhouse Gas Reductions from Informal Recycling in Bogotá, Colombia. *Journal of Industrial Ecology*, 20(1), 107–119.