

Análise da mensuração simplificada de CO_2 evitado em iniciativas de economia circular: Aplicação em "um projeto de saneamento"

Laryssa de Andrade Alves[1]
Alexandre Ali Guimarães[2]
Laís Amaral Alves[3]

Resumo

Este estudo apresenta uma análise da metodologia simplificada para estimativa de emissões de CO_2 evitadas a partir da reciclagem e reutilização de resíduos em "um projeto de saneamento". A abordagem baseia-se na aplicação de fatores médios de emissão, conforme diretrizes do GHG Protocol e do IPCC, permitindo a conversão da massa de resíduos reciclados em impacto climático evitado. Os resultados indicam uma relação diretamente proporcional entre os resíduos reciclados e as emissões evitadas, evidenciando a coerência da metodologia adotada. Conclui-se que a abordagem proposta constitui uma alternativa viável e replicável para a mensuração de impactos ambientais em projetos socioambientais de base comunitária, ainda que apresente limitações quanto à exatidão dos dados, sendo adequada para estimativas aproximadas.

Palavras-chave: Avaliação de impacto ambiental; Emissões de CO_2 evitadas; Resíduos reciclados; Metodologia simplificada.

Abstract

This study presents an analysis of the simplified methodology for estimating CO_2 emissions avoided through the recycling and reuse of waste in in a sanitation project .The approach is based on the application of average emission factors, according to the guidelines of the GHG Protocol and the IPCC, allowing the conversion of the mass of recycled waste into avoided climate impact. The results indicate a directly proportional relationship between recycled waste and avoided emissions, demonstrating the consistency of the adopted methodology. It is concluded that the proposed approach constitutes a viable and replicable alternative for measuring environmental impacts in community-based socio-environmental projects, although it presents limitations regarding data accuracy, being suitable for approximate estimates.

Keywords: Environmental impact assessment; Avoided CO_2 emissions; Recycled waste; Simplified methodology.

[1] Graduanda em Engenharia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET-RJ (laryssadeandradealves4@gmail.com).
[2] Professor de Administração, Doutorando em Engenharia de Produção, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ (alexandre.guimaraes@cefet-rj.br)
[3] Professora do PPPRO, Doutora em Engenharia Mecânica e de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ (lais.alves@cefet-rj.br)

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por mensuração de impactos socioambientais em iniciativas de sustentabilidade tem impulsionado o desenvolvimento de metodologias capazes de traduzir resultados operacionais em indicadores quantificáveis e comparáveis. No entanto, projetos de base comunitária frequentemente enfrentam limitações estruturais que dificultam a aplicação de abordagens robustas, como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), devido à necessidade de dados primários detalhados e elevado nível de especialização técnica.

Nesse sentido, a literatura aponta que a própria complexidade metodológica da mensuração de impactos pode representar uma barreira significativa à sua implementação, segundo Clark et al (2004) a mensuração de impactos socioambientais configura-se como um processo complexo, condicionado tanto pela limitação de recursos quanto pela exigência de rigor metodológico.

O processo envolve atividades de coleta, análise e interpretação de dados, demandando conhecimento técnico especializado e monitoramento contínuo de indicadores, o que, em muitos casos, ultrapassa a capacidade operacional de organizações de pequeno porte. Neste contexto, a implementação de sistemas estruturados de avaliação de impacto tende a requerer competências técnicas e recursos financeiros que nem sempre estão disponíveis nessas organizações. (Clark et al, 2004).

Diante desse cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de abordagens metodológicas simplificadas, capazes de fornecer estimativas confiáveis sem comprometer a viabilidade operacional dos projetos. Assim, este estudo tem como objetivo propor e aplicar uma metodologia simplificada para estimativa de emissões de CO_2 evitadas, com base na lógica da economia circular, utilizando como estudo de caso de “um projeto de saneamento”. A hipótese central é que a utilização de fatores médios de emissão, associados à massa de resíduos reciclados, constitui uma *proxy* confiável para a mensuração de impactos climáticos em contextos de ausência de inventários completos de ciclo de vida.

REVISÃO DA LITERATURA

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é amplamente reconhecida como uma das principais ferramentas para a quantificação de impactos ambientais associados a produtos e processos. Segundo as normas ISO 14040 e ISO 14044 (International Organization For Standardization, 2006a; 2006b), a ACV permite avaliar os impactos ambientais ao longo de todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até a disposição final.

Entretanto, a aplicação completa da ACV exige elevado volume de dados e recursos técnicos, o que limita sua utilização em contextos operacionais simplificados. Nesse cenário, o uso de fatores de emissão surge como alternativa metodológica amplamente aceita. O GHG Protocol (WRI; WBCSD, 2004; 2011) e as diretrizes do IPCC (2006) reconhecem que, na ausência de dados específicos, a utilização de fatores médios constitui uma abordagem válida para estimativa de emissões de gases de efeito estufa.

No contexto da reciclagem, estudos baseados em ACV demonstram que a substituição de matérias-primas virgens por materiais reciclados pode resultar em reduções significativas de emissões. Bases de dados consolidadas, como a Ecoinvent (Wernet et al., 2016), permitem estimar essas diferenças, enquanto relatórios setoriais, como os desenvolvidos pela PlasticsEurope (2019), apresentam perfis ambientais detalhados para diferentes materiais.

Adicionalmente, estudos aplicados ao contexto brasileiro, como o relatório elaborado pela Eureciclo em parceria com a consultoria Planton (2025), fornecem fatores médios de emissões evitadas associados à reciclagem de diferentes tipos de resíduos. Esses valores têm sido amplamente utilizados como referência em iniciativas de economia circular, permitindo a conversão de dados operacionais em indicadores de impacto climático.

METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de natureza aplicada, com abordagem predominantemente quantitativa e descritiva, voltado à proposição e aplicação de uma metodologia simplificada para a estimativa de emissões de CO_2 evitadas em um contexto real de atuação socioambiental.

O estudo foi desenvolvido no âmbito de "um projeto de saneamento", sendo conduzido a partir da análise de dados operacionais coletados no período compreendido entre junho de 2024 e junho de 2025. Como estratégia metodológica, adotou-se a integração entre dados empíricos e referenciais teóricos da literatura.

Inicialmente, foi realizada a avaliação de estudos e relatórios técnicos relacionados à Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e à aplicação de fatores de emissão, com o objetivo de identificar parâmetros adequados para a estimativa de emissões evitadas.

A coleta de dados empíricos envolveu duas frentes principais. A primeira consistiu na medição direta da massa de resíduos reciclados durante mutirões de limpeza, utilizando balanças digitais portáteis. A segunda envolveu o levantamento de dados de resíduos reutilizados na construção de tecnologias sociais, com base em medições previamente certificadas e em estimativas de peso médio por unidade, especialmente para materiais como pneus e resíduos da construção civil.

Os dados obtidos foram registrados e sistematizados em planilhas digitais, permitindo sua organização e posterior análise. A partir desses dados, foram realizados cálculos de estimativa de emissões de CO_2 evitadas, por meio da aplicação de um fator médio de emissão identificado na literatura.

A análise dos resultados foi conduzida de forma descritiva, com foco na relação entre a quantidade de resíduos reciclados e as emissões de CO_2 evitadas, buscando verificar a consistência da metodologia proposta e sua aplicabilidade em contextos de limitação de dados e recursos operacionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A mensuração das emissões de CO_2 evitadas em iniciativas de reciclagem e reutilização de resíduos fundamenta-se nos princípios da economia circular, que orientam a substituição de matérias-primas virgens por materiais reciclados ou reutilizados. Parte-se do pressuposto de que a produção, aquisição e transporte de novos insumos implicam a emissão de gases de efeito estufa (GEE), cuja magnitude varia conforme o tipo de material e os processos produtivos envolvidos. Nesse contexto, a reinserção de resíduos na cadeia produtiva contribui para a

mitigação dessas emissões, ao reduzir a demanda por extração de recursos naturais, processamento industrial e logística associada (Figura 1).

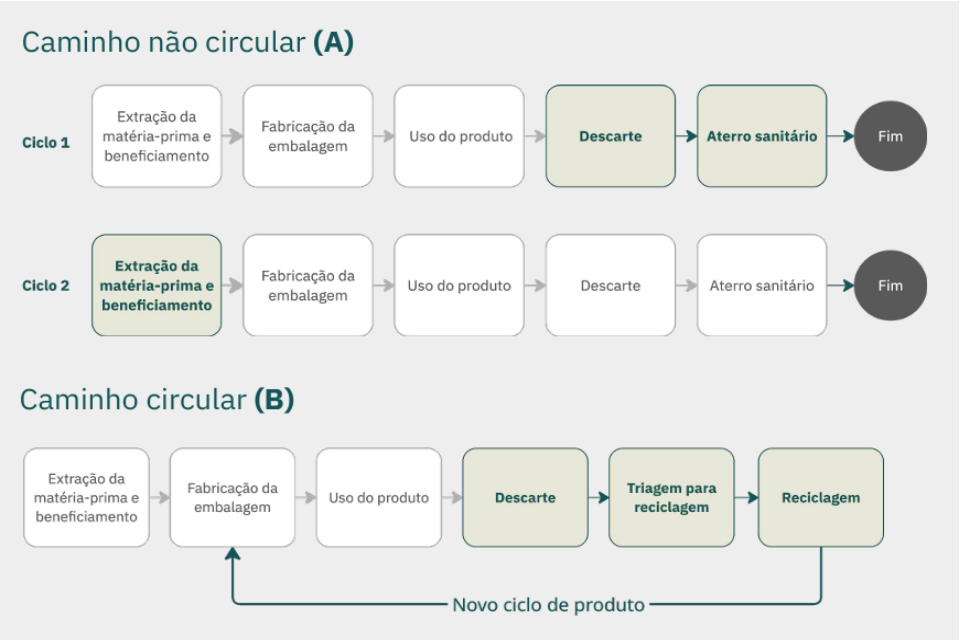


Figura 1 – Ciclo de vida de embalagem e produtos de forma não circular e circular.
Fonte: Planton e Eureciclo (2025).

Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo propor e aplicar uma metodologia simplificada para a estimativa de emissões de CO_2 evitadas em projetos socioambientais de pequena escala, utilizando indicadores de massa de resíduos e fatores médios de emissão como alternativa viável à aplicação de inventários completos de ciclo de vida. Assim, o CO_2 evitado é estimado a partir da não emissão associada à substituição de materiais convencionais por insumos secundários.

No âmbito de "um projeto de saneamento", essa lógica se aplica tanto à implementação de tecnologias sociais de saneamento básico, como as Bacias de Evapotranspiração (BETs)[4],

[4] Tecnologias sociais de saneamento utilizadas para tratar esgoto doméstico. O sistema consiste em uma estrutura impermeabilizada preenchida com camadas de materiais e plantas, onde o efluente é tratado por decomposição e absorção pelas raízes, sendo eliminado principalmente por evapotranspiração, sem descarte de efluente líquido no ambiente.

quanto às atividades de coleta seletiva realizadas em mutirões de limpeza de praias. Em ambos os casos, os resíduos deixam de ser destinados de forma inadequada e passam a desempenhar função produtiva, seja como material construtivo, seja como insumo reciclável.

O indicador referente à quantidade de resíduos coletados, reciclados e/ou reutilizados constitui, portanto, a base empírica para a estimativa das emissões de CO_2 evitadas. No projeto, esse indicador está diretamente relacionado às atividades de mutirões de coleta — realizadas de forma voluntária ou por meio de serviços ESG — e à reutilização de materiais na construção das tecnologias sociais.

A mensuração dos resíduos provenientes dos mutirões é realizada por meio de balanças digitais portáteis, selecionadas por sua acessibilidade e adequada precisão. Durante e após as atividades, os resíduos recicláveis são pesados individualmente e o processo é documentado por registros fotográficos (Figura 2), sendo posteriormente encaminhados a cooperativas de reciclagem parceiras. Ressalta-se que os participantes recebem orientações prévias sobre coleta seletiva, visando garantir a qualidade dos materiais destinados à reciclagem.



Figura 2 – Registro fotográfico de pesagem com balança portátil.

Fonte: Autoral (2025).

Os dados obtidos são sistematizados em planilhas digitais, compondo o sistema de monitoramento de indicadores do projeto. No caso da construção das BETs, a mensuração dos

resíduos reutilizados ocorre por meio de medições baseadas na massa de materiais adquiridos, principalmente entulho da construção civil, geralmente expressa em toneladas. Para materiais como pneus, utiliza-se estimativa baseada no peso médio por unidade e no número total empregado.

A integração entre a massa de resíduos reciclados/reutilizados e fatores médios de emissão permite a construção de uma metodologia simplificada para estimativa do CO_2 evitado, adequada às limitações operacionais de projetos sociais. Ressalta-se que essa abordagem não diferencia os resíduos por tipologia específica, adotando fatores médios representativos.

Tal metodologia está alinhada aos princípios da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), conforme estabelecido pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, que consideram as emissões associadas às diferentes etapas do ciclo produtivo, incluindo extração de matéria-prima, transporte, processamento e disposição final (ISO, 2006a; 2006b). No entanto, a aplicação de inventários completos de ciclo de vida demanda elevado volume de dados e recursos técnicos, o que limita sua viabilidade em iniciativas de menor escala. Nesse contexto, a utilização de fatores de emissão médios constitui alternativa metodológica amplamente aceita.

Essa abordagem é reconhecida pelo GHG *Protocol*, desenvolvido pelo *World Resources Institute* (WRI) e pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), que estabelece diretrizes para contabilização de emissões e recomenda o uso de fatores médios na ausência de dados específicos (WRI; WBCSD, 2011). Assim, a estimativa das emissões evitadas pode ser expressa conforme a Equação (1):

$$CO_2 \text{ evitado} = \text{Massa de resíduos} \times \text{Fator médio} \quad (1)$$

No contexto nacional, o estudo *Impactos da Reciclagem na Emissão de Carbono*, desenvolvido pela Planton em parceria com a Eureciclo (2025), constitui um relatório técnico amplamente utilizado, apresentando fatores médios de emissões evitadas para diferentes materiais com base em estudos de ACV. A Figura 3 sintetiza esses valores.

Material	Benefício em tCO_2e por tonelada reciclada
PLÁSTICO	2,128
METAIS	9,595
PAPEL	1,348
VIDRO	0,354

Figura 3 - Benefício em tCO_2e por tonelada reciclada por tipo de material.

Fonte: Planton e Eureciclo (2025).

A adoção do fator de 1,5 kg CO_2e evitado por kg de resíduo reciclado em "um projeto de saneamento" fundamenta-se em valores reportados na literatura de ACV, que indicam uma faixa típica de evitação entre 1 e 2 kg CO_2e por kg de plástico reciclado, a depender do tipo de material e das condições operacionais (Wernet et al., 2016; PlasticsEurope, 2019). Considerando essa faixa, optou-se pela utilização do valor médio como aproximação representativa e conservadora. Essa escolha evita a superestimação dos impactos, especialmente diante de incertezas operacionais, como perdas logísticas, contaminação dos resíduos e variabilidade nos processos de reciclagem.

A análise dos resultados evidencia uma relação diretamente proporcional entre a quantidade de resíduos reciclados e as emissões de CO_2 e evitadas. Conforme ilustrado no Gráfico 1, observa-se que as variações nas duas variáveis ocorrem de forma sincronizada ao longo do período analisado, com aumento expressivo em fevereiro e maio de 2025, redução em março e ausência de registros em abril. Esse comportamento decorre do fato de que o cálculo

de CO_2 evitado está diretamente associado à massa de resíduos processados, por meio da aplicação de fatores médios de emissão.

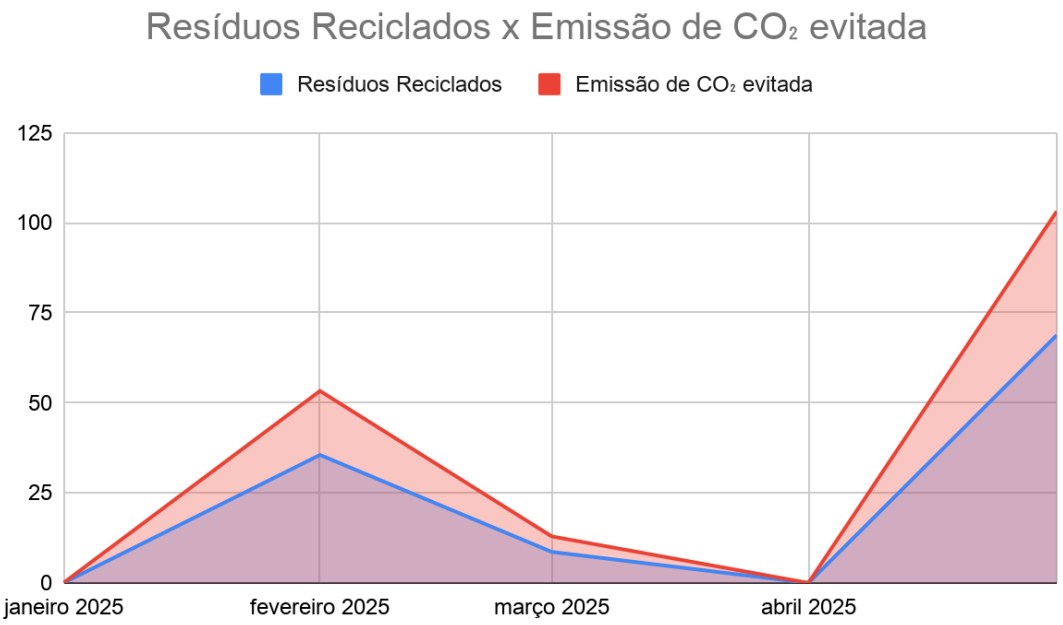


Gráfico 1 – Relação entre resíduos reciclados e emissão de CO_2 evitada em "um projeto de saneamento".

Fonte: Autoral (2025).

Os resultados obtidos indicam que a abordagem proposta é capaz de gerar estimativas coerentes e consistentes, mesmo em contextos com limitações de dados e recursos, evidenciando seu potencial como ferramenta aplicável à mensuração de impacto ambiental em iniciativas de economia circular de pequena escala. Dessa forma, os achados não apenas validam a coerência da metodologia adotada, como também reforçam sua aplicabilidade prática, indicando que a ampliação das atividades de coleta e destinação adequada de resíduos contribui diretamente para o aumento do impacto ambiental positivo gerado. Nesse sentido, o volume de resíduos reciclados mostra-se um indicador proxy relevante para a estimativa de emissões evitadas na ausência de inventários detalhados de ciclo de vida.

Entretanto, ressalta-se que, para a obtenção de estimativas mais detalhadas e precisas, conforme apontado nos estudos analisados, seria necessária a quantificação exata das tipologias e quantidades de resíduos coletados nos mutirões, bem como a caracterização específica dos materiais que compõem o entulho reutilizado nas BETs. No entanto, o projeto ainda não dispõe de tecnologia e estrutura adequadas para esse nível de análise crítica, o que inviabiliza a aplicação de metodologias mais robustas. Assim, a abordagem simplificada adotada configura-se como uma alternativa viável para aproximar o impacto ambiental gerado, embora apresente limitações relevantes do ponto de vista acadêmico e científico, especialmente no que se refere à exatidão e ao detalhamento dos dados obtidos.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que a utilização de uma metodologia simplificada, baseada na aplicação de fatores médios de emissão, constitui uma alternativa viável para a mensuração de emissões de CO_2 evitadas em projetos socioambientais de pequena e média escala. A relação diretamente proporcional observada entre a quantidade de resíduos reciclados e as emissões evitadas reforça a consistência da abordagem adotada e valida o uso desse indicador como *proxy* de impacto climático.

Além disso, a metodologia proposta demonstra-se alinhada às diretrizes internacionais, como o GHG Protocol e o IPCC, garantindo respaldo técnico mesmo em contextos de ausência de inventários completos de ciclo de vida. Dessa forma, o estudo contribui para a democratização da mensuração de impactos ambientais, ao oferecer uma ferramenta acessível, replicável e adaptável à realidade de iniciativas de base comunitária.

No entanto, é importante destacar que esse tipo de metodologia só é aplicável quando não há outros meios de quantificação, apresentando limitações quanto à exatidão dos dados oferecidos.

Por fim, destaca-se que a adoção de metodologias simplificadas não apenas viabiliza o monitoramento de impactos, mas também fortalece a transparência, a comunicação de resultados e o potencial de escalabilidade de projetos de economia circular, ampliando sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas.

Por fim, destaca-se que, apesar de apresentar limitações quanto à exatidão dos dados, a adoção de metodologias simplificadas viabiliza o monitoramento aproximado dos impactos ambientais em projetos de economia circular, principalmente aqueles de pequeno porte, ampliando sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

Uso de IA: Chat GPT — Revisão de Linguagem — 18/03/2026

CLARK, C.; ROSENZWEIG, W.; LONG, D.; OLSEN, S. *Double bottom line project report: assessing social impact in double bottom line ventures*. New York: Rockefeller Foundation, 2004.

EURECICLO; PLANTON. *Impactos da reciclagem nas emissões de carbono*. São Paulo: eureciclo, 2025. Disponível em: https://eureciclo.com.br/ebooks-e-guias/impactos-da-reciclagem-nas-emissoes-de-carbono. Acesso em: 16 mar. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva: IPCC, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 14040:2006 – Environmental management — life cycle assessment — principles and framework*. Geneva: ISO, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 14044:2006 – Environmental management — life cycle assessment — requirements and guidelines*. Geneva: ISO, 2006b.

PLASTICSEUROPE. *Eco-profiles and environmental product declarations of the European plastics manufacturers*. Brussels: PlasticsEurope, 2019.

WERNET, G. et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 21, p. 1218–1230, 2016.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *The greenhouse gas protocol: a corporate accounting and reporting standard*. Washington, DC: WRI; WBCSD, 2004.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI); WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). *GHG protocol corporate value chain (scope 3) accounting and reporting standard*. Washington, DC, 2011.