

VALORAÇÃO AMBIENTAL DA RECICLAGEM PARA A REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO₂

Edson Henrique Gaspar Massi. Engenheiro Ambiental, Mestrando em Bioenergia, Universidade Estadual de Londrina. edsonmassi@gmail.com
Leliana Aparecida Casagrande Luiz. Geógrafa, Servidora Pública, Instituto Ambiental do Paraná. lelianacl@iap.pr.gov.br
Clarissa Gaspar Massi. Bacharel em Direito, Doutoranda em Geografia, Universidade Estadual de Londrina. claragmassi@gmail.com

Resumo: O presente trabalho buscou evidenciar a importância da reciclagem de resíduos sólidos como ferramenta na mitigação dos impactos ambientais, através da valoração da reciclagem com vistas à redução de CO₂. O objetivo da pesquisa foi estimar a destinação dos principais resíduos de uma empresa recicladora na região metropolitana de Londrina/Paraná/Brasil no ano de 2017, realizando a valoração ambiental desses resíduos como forma de reduzir emissões de CO₂. Para facilitar os cálculos foram divididos os materiais em 4 grupos, Papel (papel branco, papel misto, *tetra pak* e papelão) 2004,55 t; Plástico (PEAD, PEBD, PS, PP e Pet) 741,84 t; Alumínio 42,06 t e Vidro 14 t. A metodologia utilizada consiste em valorar a reciclagem fundamentada no cálculo Recuperação e Reciclagem de Materiais de Resíduos Sólidos (AMS-III.AJ), onde foram calculadas as emissões decorrentes da produção (BE) e da reciclagem (ER), esta ferramenta possibilita a visualização na redução de CO₂, proposta pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC), o resultado foi chamado de valor ambiental da reciclagem (RE) com cada grupo apresentando seu respectivo valor ambiental: Papel: 5.224,87 KgCO₂ t⁻¹; Plástico: 3.979,08 KgCO₂ t⁻¹; Alumínio: 16.301,02 KgCO₂ t⁻¹ e Vidro: 309,16 KgCO₂ t⁻¹. Por fim, quando atrelado a reciclagem destinada (t) com o valor ambiental da reciclagem (KgCO₂ t⁻¹), obtém as emissões evitadas pelo processo, 14.115.303,01 Kg de CO₂ em 2017. Em que pese os resultados da valoração ambiental da reciclagem com vistas à redução nas emissões de CO₂ corroboram a importância de se avaliar o serviço prestado pela reciclagem como forma de contribuição efetiva na mitigação da degradação ambiental.

Palavras-chave: reciclagem, valoração ambiental, emissões evitadas.

Environmental Valuation of Recycling for the Reduction of CO₂ Emissions

Abstract: The present study sought to highlight the importance of solid waste recycling as a tool in mitigating the environmental impacts, which was proposed assess recycling aiming at reduction of CO₂, a major greenhouse gas. The goal of this research is to estimate the distribution of the main waste recycler company in the metropolitan region of Londrina/Parana/Brazil in the year 2017, realizing the environmental valuation of such waste as a way of avoiding emissions of CO₂. To facilitate the calculations were divided in 4 groups materials, Paper (white paper, mixed paper, *tetra pak* and cardboard) 2004,55 t; Plastic (HDPE, LDPE, PS, PP, Pet) 741,84 t; aluminum 42 t and glass 14 t. The methodology used is to assess the recycling based on the calculation of Materials recovery and recycling of solid waste (AMS-III. AJ), where were calculated the emissions resulting from the production (BE) and recycling (ER), this tool allows viewing on CO₂ reduction, proposed by the United

Nations Framework Convention on climate change (UNFCCC), the result was called the environmental value of recycling (RE) with each group presenting its respective environmental value: Paper: 5.224,87 KgCO₂ t⁻¹; Plastic: 3.979,08 KgCO₂ t⁻¹; Aluminum: 16.301,02 KgCO₂ t⁻¹ and Glass: 309,16 KgCO₂ t⁻¹. Finally, when intended for recycling trailer (t) with the environmental value of recycling (KgCO₂ t⁻¹), gets the emissions avoided by the process, 14.115.303,01 Kg of CO₂. Despite the results of the environmental assessment of recycling with a view to reducing CO₂ emissions corroborated the importance of evaluating the service provided by recycling as form of effective contribution in the preservation of the environment.

Key words: recycling, environmental valuation, emissions avoided.

1. INTRODUÇÃO

A dificuldade para encontrar uma solução que trate desde o consumo exarcebado até a disposição ambientalmente correta dos resíduos sólidos é comparável a outros problemas atuais, como o abastecimento de água potável, implantação de saneamento básico em residências, os desmatamentos em larga escala e a geração dos gases de efeito estufa (GEE) (CARVALHO JÚNIOR & MCQUAY, 2007).

Uma das alternativas para atenuar os efeitos dos GEE são políticas de incentivo a implantação de tecnologias que reduzem e/ou capturem as emissões de dióxido de carbono equivalente, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Os projetos de MDL se baseiam em princípios da sustentabilidade (meio ambiente, economia, sociedade e cultura), um consenso de objetivos nestas áreas deve ser alcançado (BARTON et al., 2008; NAJAM et al., 2003). A aplicabilidade do MDL é possível com vistas à contribuição do serviço prestado pela reciclagem que auxilia no reaproveitamento dos resíduos sólidos, propiciando uma economia de recursos naturais e energéticos, além de contribuir com a diminuição dos GEE.

Isto posto, o presente trabalho possui como cerne a valoração ambiental da reciclagem de resíduos sólidos com vistas à redução de emissões de CO₂, um dos GEE. Os objetivos da pesquisa consistem em: Elencar os materiais reciclados mais comercializados pela empresa recicladora; Aplicar o cálculo Recuperação e Reciclagem de Materiais de Resíduos Sólidos (*Recovery and Recycling of Material from Solid Waste – AMJ – III.AJ*) (UNFCCC, 2011); e apresentar a redução na emissão de CO₂ em virtude da reciclagem, o estudo terá como oferta de dados uma empresa recicladora na região metropolitana de Londrina/Paraná/Brasil no ano de 2017.

2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E AS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

A problemática dos resíduos sólidos urbanos (RSUs) é uma constante, pois devido ao consumo, sempre vai haver a geração de resíduos sólidos. Em consequência da permanente geração de resíduos tende aos impactos ambientais tornarem-se cada vez mais frequentes.

De acordo com os dados informados pelos municípios brasileiros pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) ao Ministério das Cidades, foi criado o diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2016, elaborado e publicado em março de 2018, nele constata-se que a massa coletada per capita média de resíduos domiciliares e públicos para o sul do Brasil é de 0,81 kg/hab./dia (MC, 2018). No que tange à recuperação de recicláveis secos (papel, plástico, vidro e metais), o valor médio da massa recuperada per capita calculada para o conjunto pesquisado era de 0,02 kg/hab./dia (MC, 2018).

No tocante, foi criada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), lei nº 12.305/2010 que é um marco regulatório importante que influenciou diretamente as responsabilidades dos consumidores, das empresas e na gestão dos municípios, no que se refere à Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos (GIRS) (SILVA LUIZ et al., 2017).

A GIRS apresenta oportunidades para reduções nas emissões de GEE, sendo que análises de ciclo de vida (ACV) permitem quantificar essas economias, que abrangem desde as ações de redução na geração de resíduos até a forma da sua disposição final, passando pelo reaproveitamento via reciclagem, compostagem e recuperação energética (GODECKE et al., 2012).

Diversos processos relacionados à geração e à gestão dos RSUs, direta e indiretamente, emitem gases de efeito estufa geralmente chamados na literatura de CO₂ e equivalentes (CO₂-eq.), um agregado de gases que contribuem para as mudanças climáticas (KING et al., 2016).

3. A RECICLAGEM COMO FERRAMENTE NA MITIGAÇÃO DOS GEE

Mudança nos padrões de consumo da sociedade e uma redução na quantidade de resíduos sólidos gerados contribuiriam significativamente para mitigar o impacto dos RSUs. Uma premissa fundamental para promover tais transformações é a percepção de resíduos como recursos e, com isso, sua valorização (GUTBERLET, 2012). Uma vez gerados, a reutilização ou a reciclagem dos resíduos sólidos, reintroduzindo estes materiais como

recursos brutos em uma cadeia de produtos, são práticas ambientais e sociais mais vantajosas que o descarte ou a incineração (KING et al., 2016).

Os tipos de materiais recicláveis que são separados em uma planta de segregação dependem da procura pela indústria. Na maioria das vezes são segregados: papéis e papelões; plásticos (PVC, PEAD, PET, PEBD, PP, PS, etc.); vidros; metais ferrosos (ferro e aço); e metais não ferrosos (alumínio, cobre, chumbo, níquel e zinco) (GRIPPI, 2006).

As políticas públicas de cunho social e ambiental que tratam da reciclagem também valorizam o trabalho dos coletores informais e das cooperativas, que dão contribuição importante para a sociedade como agentes ambientais e prestadores de serviços (GUTBERLET & JAYME, 2012).

Estima-se que, em um cenário ideal de reciclagem, teria sido possível evitar a emissão de 18 a 28 milhões de toneladas de dióxido de carbono no Brasil, no período de 2000 a 2007 (PEREIRA et al., 1999). Portanto, a reciclagem de resíduos sólidos urbanos representa uma importante forma de atenuar os impactos dos gases de efeito estufa, contribuindo em direção a um desenvolvimento mais sustentável.

4. METODOLOGIA

4.1 Reduções de Emissões de CO₂ Através da Reciclagem

A redução das emissões de GEEs proporcionada pelas atividades de um projeto de MDL deve ser calculada se considerando as emissões da linha de base como referência. A metodologia AMS-III.A.J - *Emission Reductions by Using Recycling Material Instead of Raw Material* - aprovada pelo CE-MDL - trata da redução das emissões de GEE decorrente das atividades de recuperação e reciclagem de materiais, transformando-os em um novo produto final ou em insumo para outras cadeias produtivas (UNFCCC, 2011).

A redução das emissões decorrente da reciclagem dos materiais citados é obtida através da diferença entre as emissões da linha de base e as emissões do projeto proposto, sendo deduzidas as emissões fugitivas, conforme a equação 1 definida pela metodologia AMS-III.AJ e apresentada a seguir:

$$RE_y = BE_y - PE_y - LE_y \quad (1)$$

Onde:

RE_y: Redução das emissões no ano y (tCO₂eq);

BE_y: Emissões da linha de base no ano y (tCO₂eq);

PE_y: Emissões do projeto no ano y (tCO₂eq);

LE_y: Emissões fugitivas no ano y (tCO₂eq).

A equação 1 contempla as chamadas “emissões fugitivas”, que corresponde às emissões de GEEs que ocorrem fora do limite da atividade de projeto do MDL. Todavia, vale salientar que o modelo aqui utilizado não considera as emissões fugitivas, pois elas não são significativas em projetos de reciclagem.

4.2 Emissões da Linha de Base (BE)

A linha de base (BE) é um cenário de um projeto de MDL, que se empenha em representar emissões de GEE de uma atividade. Sua maior importância está relacionada à quantificação de Reduções Certificadas de Emissões (RCE) do MDL. Esses certificados surgem da diferença das emissões de linha de base em relação às reduções de emissões verificadas devido ao exercício de um projeto MDL de redução de emissões (CGEE, 2010).

A metodologia AMS.III-AJ determina que o cálculo da linha de base para projetos de reciclagem candidatos ao MDL deve considerar as emissões associadas ao consumo de energia elétrica e de combustíveis fósseis para a produção do PEAD, PEBD e PET. Ainda segundo a metodologia, mesmo que a origem do material seja desconhecida, as emissões da produção desse material a partir da matéria-prima virgem são calculadas com base nas condições típicas do país onde é executado o projeto de reciclagem (LIMA, 2012). O fator de emissão de CO₂ da energia elétrica calculado é o gerado no país anfitrião do projeto, mesmo que este material tenha sido produzido em outro país.

As emissões da linha de base para a produção dos materiais são calculadas através da equação 2. Em resumo, deve ser considerada a quantidade de combustíveis fósseis e energia elétrica utilizada na fabricação de determinada quantidade do material.

$$BE_y = \sum_i [Q_{i,y} * Li * (SEC_{Bl,i} * EF_{el,y} + SFC_{Bl,i} * EF_{FF,CO2})] \quad (2)$$

Onde:

BE_y: Emissões da Linha de Base no ano y (tCO₂eq y⁻¹);

i: Índices para o tipo de material i (i = 1,2,3 para PEAD, PEBD e PET);

Q_{i,y}: Quantidade do plástico tipo i reciclado no ano t (t y⁻¹);

Li: Fator de ajuste para compensar a degradação da qualidade do material e as perdas do material no processo de produção do produto final utilizando o material reciclado;

SEC_{Bl,i}: Consumo específico de energia elétrica para a produção do material virgem tipo i (MWh t⁻¹);

$EF_{el,y}$: Fator de emissão do grid de geração de eletricidade, de acordo com a versão mais recente da “Ferramenta para calcular o fator de emissão de um sistema de eletricidade” ($tCO_2 MWh^{-1}$);

$SFC_{Bi,i}$: Consumo Específico de combustíveis para a produção do material virgem do tipo i ($GJ t^{-1}$);

EF_{ff,CO_2} : Fator de emissão de CO_2 para o combustível fóssil ($tCO_2 GJ^{-1}$).

O fator de emissão de CO_2 da energia elétrica ($EF_{el,y}$) diz respeito à quantidade de CO_2 equivalente emitida para cada quilowatt-hora (kWh) de energia elétrica gerado no país anfitrião do projeto. Quanto ao fator de emissão dos combustíveis fósseis (EF_{ff,CO_2}), também está relacionado à quantidade de CO_2 equivalente emitida pela queima de cada Joule (J) de energia térmica gerada pelo combustível utilizado.

A metodologia sugere o uso de um fator de ajuste Li que busca compensar as perdas no processo de reciclagem e na degradação da qualidade do material. A US EPA (2006) publicou um relatório sobre gestão de RSU e emissões de GEEs no qual cita as taxas de produtos reciclados para cada tonelada de resíduo que entra no processo de reciclagem. Essas taxas de Li são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Fator de Ajuste dos Materiais (Li)

Material	(Li)
Alumínio	0,93
Plástico	0,75
Papel	0,93
Vidro	0,88

Fonte: US EPA (2006)

4.3 Emissões do Projeto (PE)

Segundo a metodologia AMS.III-AJ o cálculo das emissões de CO_2 das atividades do projeto deve ser realizado considerando as mesmas variáveis utilizadas na linha de base, baseadas no consumo de energia elétrica e consumo de combustíveis fósseis. Aqui deverão ser consideradas as quantidades desses insumos utilizados nas atividades do projeto de reciclagem, conforme Equação 3.

$$PE_Y = \sum (EC_{i,y} * EF_{el} + FC_{i,y} * NCV_{FF} * EF_{FF,CO_2}) \quad (3)$$

Onde:

PE_y : Emissões do projeto no ano y ($tCO_2eq\ y^{-1}$);

i : Índices para o plástico tipo i ($i = 1,2$);

$EC_{i,y}$: Consumo de energia elétrica da unidade de reciclagem proporcional ao plástico tipo i ($MWh\ t^{-1}$) no ano y ;

$FC_{i,y}$: Consumo de combustíveis da unidade de reciclagem proporcional ao plástico tipo i (unidade de massa ou volume t^{-1}) no ano y ;

NCV_{FF} : Poder calorífico do combustível fóssil consumido na unidade de reciclagem no ano y ($GJ/unidade\ de\ massa\ ou\ volume$) (uso não obrigatório);

EF_{FF,CO_2} : Fator de emissão de CO_2 para o combustível fóssil consumido na unidade de reciclagem ($tCO_2\ GJ^{-1}$).

4.4 Desenvolvimento da Metodologia AMSIII-AJ Aplicada no Estudo

São consideradas como *BE* as emissões relacionadas à produção dos materiais a partir da matéria-prima virgem, enquanto a *PE* se refere às emissões decorrentes das atividades de reciclagem dos resíduos.

Lima (2012) amplia o escopo da metodologia AMSIII-AJ, utilizando também os dados necessários para o cálculo das emissões decorrentes da produção e reciclagem de outros materiais, como vidro, papel e alumínio, utilizando o *Li* adequado para cada material. O *Li* empregado na equação 2 para o cálculo das emissões da linha de base, representa o fator que visa corrigir as perdas e degradações de material ocorridas no processo de reciclagem.

Os materiais considerados na valoração são os mais comercializados pela empresa de reciclagem, portanto os que obtiveram o destino ambientalmente correto, sendo estes agrupados em quatro grupos: Plásticos; Alumínio; Vidro e Papel. O grupo do papel engloba o papel branco, papel misto, *Tetra Pak*, jornal e papelão. O plástico contém PEAD, PP, PVC, PET e PEBD. Para estimar a quantidade de energia elétrica e combustível fóssil utilizada na produção e na reciclagem dos materiais foram empregados dados da UNFCCC, 2011. A complexidade e limitação das informações disponíveis tornam os dados aqui estimados, visualizados com cautela, mesmo que extraídos da literatura técnica.

4.4.1 Definição do Fator de Emissão de CO_2

O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação (MCTIC) calcula e divulga dois tipos de fatores de emissão de CO₂ para a energia elétrica gerada no Brasil: o primeiro para ser usado em projetos no âmbito do MDL (baseado em metodologias aprovadas pelo CE-MDL) e o segundo para ser usado na elaboração de inventários. Os fatores de emissão de CO₂ resultantes da geração de energia elétrica proveniente do Sistema Interligado Nacional do Brasil (SIN) são calculados a partir dos registros de geração das usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e, em especial, nas usinas termoeletricas.

Os fatores de emissão de CO₂ da energia elétrica gerada no SIN têm como objetivo simplesmente estimar a quantidade de CO₂ emitida na atmosfera decorrente da geração de certa quantidade de energia elétrica nesse sistema. Esse método calcula a média das emissões da geração, levando em consideração todas as usinas que estão gerando energia no SIN e não somente aquelas que estejam funcionando na margem. Se todos os consumidores de energia elétrica do SIN calculassem as suas emissões multiplicando a energia consumida por esse fator de emissão, o somatório corresponderia às emissões do SIN (LIMA, 2012).

A redução das emissões de CO₂ no SIN ocorre quando há um deslocamento da energia gerada na margem, em virtude a execução de projetos que geram energia mais limpa para o SIN ou que economizam energia do sistema, como é o caso da reciclagem. Na Tabela 2 é apresentado o fator de emissão de CO₂ da energia elétrica referente ao ano de 2017 publicado pelo MCTIC e que é utilizado na metodologia para calcular as emissões decorrentes do uso da energia elétrica na produção e reciclagem dos materiais.

Tabela 2 – Fator de Emissão de CO₂ da Energia Elétrica Gerada no Brasil

Fator Médio Anual (tCO₂/MWh)
ANO – 2016
0,0817
ANO – 2017
0,0927

Fonte: MCTIC (2017)

4.4.2 Cálculo dos Fatores de Emissões de CO₂ de Combustíveis Fósseis

O fator de emissão de CO₂ por unidade de combustível fóssil consumido é calculado, conforme a equação 5, com base no poder calorífico dos combustíveis e em fatores de emissão por unidade de energia (BRASIL, 2008).

$$FC_c = CE_c * FE_c * OX_c * \frac{44}{12} \quad (5)$$

Onde:

FC_c: Fator de emissão de CO₂ por quantidade de combustível (U_c) consumido (tCO₂ U_c⁻¹);

CE_c: Conteúdo de energia por unidade de combustível (J U_c⁻¹);

FE_c: Fator de emissão de carbono por quantidade de energia do combustível c (tC J⁻¹);

OX_c: Fator de oxidação do combustível (adimensional);

44/12: Correção da massa molecular de CO₂ e Carbono.

Os valores de conteúdo de energia por unidade de combustível (CE_c), dos fatores de emissão de carbono por quantidade de energia do combustível (FE_c) e os fatores de oxidação dos combustíveis (OX_c) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados dos combustíveis fósseis

Combustível	Unid.	CE _c TJ Unid ⁻¹	FE _c tC TJ ⁻¹	Ox _c
Óleo Combustível¹	10 ³ t	40,15	21,1	0,99
Óleo Diesel²	10 ³ t	35,52	20,2	0,99
Gás Natural³	10 ⁶ m ³	36,84	15,3	0,995
Licor Negro⁴	10 ³ t	11,97	26	0,99
Madeira⁵	10 ³ t	12,98	30,5	0,99

Fonte: EPE (2017); IPCC (2006).

Através da utilização da equação 5 e dos dados da Tabela 3 são calculados a seguir os fatores de emissão dos combustíveis fósseis (FC) considerados pela metodologia, Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo do Fator de emissão (FC) de CO₂ por quantidade de combustível consumido (tCO₂ U_c⁻¹)

FC¹ Óleo Combustível	= 3075,209 tCO ₂ 10 ³ t ⁻¹
FC² Óleo Diesel	= 2604,5395 tCO ₂ 10 ³ t ⁻¹
FC³ Gás Natural	= 2056,3904 tCO ₂ 10 ⁶ m ⁻³
FC⁴ Licor Negro	= 1129,7286 tCO ₂ 10 ³ t ⁻¹
FC⁵ Madeira	= 1437,0807 tCO ₂ 10 ³ t ⁻¹

Fonte: Autoria própria, 2018.

A metodologia AMS-III.AJ indica que os fatores de emissão dos combustíveis fósseis utilizados no cálculo da *BE* e da *PE* devem ser expressos em termos de quantidade de CO₂ por Joule. Dessa forma, os valores calculados acima são convertidos para quilograma de CO₂ por mega-joule. Considerando, por exemplo, que 40,15 TJ de óleo combustível emitem 3.075,21 tCO₂ e que 1 TJ equivale a 106 MJ, apresentamos os resultados na Tabela 5.

Tabela 5 – Cálculo da conversão do fator de emissão (FC) de CO₂ por quantidade de combustível consumido em KgCO₂ MJ⁻¹

FC¹	= 6,593 tCO ₂ TJ ⁻¹	= 0,076593 KgCO₂ MJ⁻¹
FC²	= 73,326 tCO ₂ TJ ⁻¹	= 0,073326 KgCO₂ MJ⁻¹
FC³	= 55,8195 tCO ₂ TJ ⁻¹	= 0,05582 KgCO₂ MJ⁻¹
FC⁴	= 94,38 tCO ₂ TJ ⁻¹	= 0,09438 KgCO₂ MJ⁻¹
FC⁵	= 110,715 tCO ₂ TJ ⁻¹	= 0,11071 KgCO₂ MJ⁻¹

Fonte: Autoria própria, 2018.

Os valores acima calculados serão utilizados para expressar a quantidade de CO₂ emitida pela queima de cada MJ dos combustíveis fósseis consumidos na produção e na reciclagem dos materiais. Observa-se que o conteúdo de energia por unidade de combustível e o fator de emissão de carbono por quantidade de energia do combustível são elementos de grande impacto quando se trata das emissões de GEEs decorrentes de sua utilização (LIMA, 2012).

4.4.3 Cálculo de Emissões Decorrentes da Produção dos Materiais (BE)

As emissões da produção dos materiais correspondem às emissões da *BE*, onde são considerados os consumos de energia elétrica, combustíveis fósseis e seus respectivos fatores de emissão de CO₂. Conforme a metodologia AMS-III.AJ, o cálculo das emissões decorrentes da produção dos materiais é realizado através da equação 2.

A Tabela 6 apresenta os consumos de energia elétrica (em kWh) para produção de 1 tonelada de cada material, aqui se utilizou Sabetai Calderoni “Os Bilhões Perdidos no Lixo”, 2003 .

Tabela 6 - Consumo de Energia Elétrica para Produção dos Materiais

Material	SECBI (KWh)
Plástico	6740
Alumínio	17600
Vidro	4830
Papel	4980

Fonte: Calderoni, 2003.

As fontes pesquisadas e os consumos específicos de combustíveis fósseis (em MJ) utilizados para produção de 1 tonelada de cada material empregado pela valoração ambiental, são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Consumo de Combustíveis Fósseis para Produção dos Materiais

Material	Combustível	SFCBI (MJ)
Plástico ¹	Gás Natural	15000
	Óleo	
Alumínio ²	Combustível	24974,07
Vidro ³	Gás Natural	8025,6
	Gás Natural	9550
Papel ⁴	Óleo	
	Combustível	2123
	Licor Negro	22122

Fonte: UNFCCC (2011)¹; IPEA (2010)²; MME (2011)³; BRACELPA (2010)⁴

Vlachopoulos (2009) e US EPA (2006), afirmam que o processo de reciclagem implica em perdas de materiais e o rendimento não é de uma tonelada de material reciclado a cada tonelada de resíduo que entra no processo de reciclagem. Por esse motivo, o cálculo das emissões da *BE* se vale de um fator de ajuste *Li* para compensar as perdas no processo de reciclagem e a degradação da qualidade do material. A valoração ambiental utiliza os fatores de ajuste apresentados na Tabela 1. Abaixo são apresentados os cálculos das emissões da *BE* decorrentes da produção de 1 tonelada dos materiais considerados, expressas em quilogramas de CO₂ equivalente (KgCO₂eq). Conforme indicado pela equação 6 e apresentados na Tabela 8, são utilizados para esse cálculo as quantidades de energia elétrica e combustíveis fósseis consumidos no processo.

Tabela 8 – Cálculo das quantidades de energia elétrica e combustíveis fósseis consumidos no processo (KgCO₂eq)

BE Plástico	= 5313,96 KgCO ₂ eq
BE Alumínio	= 16949,92 KgCO ₂ eq
BE Vidro	= 4334,346 KgCO ₂ eq
BE Papel	= 6880,191 KgCO ₂ eq

Fonte: Autoria própria, 2018.

4.4.4 Emissões decorrentes da reciclagem de resíduos (ER)

Seguindo a sugestão de Lima (2012), a equação 3 emissões de projeto *PE*, tem uma adaptação na equação 7, assim substituindo emissões de projeto *PE* por emissões decorrentes da reciclagem (ER) dos materiais. Conforme indicado pela metodologia AMS-III.AJ, as emissões da reciclagem também são calculadas em função do consumo de energia elétrica e combustíveis fósseis utilizados no processo, bem como seus respectivos fatores de emissão de CO₂. Os aspectos que necessitaram ser adaptados foram: a quantidade do material reciclado (Q_i); os consumos específicos de energia elétrica (SEC_i) e de combustíveis fósseis (SFC_i) para reciclagem dos materiais. A Equação 7 é apresentada a seguir contemplando as adaptações comentadas anteriormente.

$$ER = \sum_i [Q_i * (SEC_i * EF_{el} + SFC_i * EF_{FF,CO_2})] \quad (7)$$

Onde:

ER: Emissões decorrentes da reciclagem do material i (tCO₂eq);

i: Índices para o material tipo i (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 para PEAD, PEBD, PET, alumínio, vidro e papel);

Q_i: Quantidade do material tipo i reciclado (t);

SEC_i: Consumo específico de energia elétrica da unidade de reciclagem proporcional ao material tipo i (MWh t⁻¹);

EF_{el}: Fator de emissão do grid de geração de eletricidade, de acordo com a versão mais recente da “Ferramenta para calcular o fator de emissão de um sistema de eletricidade” (tCO₂eq MWh⁻¹);

SFC_i: Consumo específico de combustíveis da unidade de reciclagem proporcional ao material tipo i (unidade de massa ou volume t⁻¹);

EF_{FF,CO₂}: Fator de emissão de CO₂ para o combustível fóssil consumido na unidade

de reciclagem ($\text{tCO}_2 \text{ GJ}^{-1}$).

A Tabela 9 apresenta os consumos de energia elétrica (em kWh) para reciclagem de 1 tonelada de cada material. Todos os consumidores do SIN pagam um valor na fatura de energia para que as concessionárias implementem ações e revertam esses recursos em benefícios do consumidor, incentivando a adoção de práticas eficientes quanto ao uso da energia elétrica (LIMA, 2012).

Tabela 9 - Consumo de Energia Elétrica para Reciclagem dos Materiais

Material	SEC_i (kWh)
Plásticos	1440
Alumínio	700
Vidro	4190
Papel	1470

Fonte: Calderoni, 2003

Na Tabela 10 são apresentadas as fontes pesquisadas e os valores dos combustíveis fósseis (em MJ) utilizados para reciclagem de 1 tonelada de cada material empregado na valoração ambiental, ressalta-se que não foram encontrados na literatura dados a cerca do alumínio e plástico.

Tabela 10 - Consumo de Combustíveis Fósseis para Reciclagem dos Materiais

MATERIAL	COMBUSTÍVEL	SFC_i (MJ)
Plásticos	---	---
Alumínio	---	---
Vidro ¹	GÁS NATURAL	2.527,00
Papel ¹	GÁS NATURAL	5.242,33

Fonte: LIMA¹ (2012)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo de valoração ambiental da reciclagem de resíduos sólidos urbanos procura estabelecer uma relação entre a reciclagem dos materiais e a redução das emissões de CO_2 que essa prática proporciona. A reciclagem de um material permite sua reintrodução na cadeia produtiva, proporcionando economia de energia e combustíveis fósseis, gera renda aos agentes do setor, contribui com a longevidade dos aterros aumentando seu tempo de vida, propicia a redução de impactos ambientais no tocante à diminuição de resíduos

descartados em locais inadequados, bem como na redução da extração de mais recursos naturais, além de reduzir as emissões de GEEs.

A redução das emissões de GEEs estudada é calculada, portanto, como sendo a diferença entre as emissões da linha de base (BE) e as emissões decorrentes da reciclagem dos materiais (ER) (LIMA, 2012). Cabe destacar que o modelo não considerou as emissões fugitivas, pois além de não serem significativas em projetos de reciclagem, as mesmas se referem a situações que ocorrem em projetos específicos, como vazamentos, perdas, etc.

Através do uso da Equação 7 e usando dados da Tabela 10, são calculadas as emissões decorrentes da reciclagem de 1 tonelada de cada um dos materiais considerados, expressas em quilogramas de CO₂ equivalente (KgCO₂eq), como exposto na Tabela 11.

Tabela 11 - Cálculo das quantidades de emissões decorrentes da reciclagem de 1 tonelada de material reciclado (KgCO₂eq)

ER Plástico	=	1334,88 KgCO ₂ eq
ER Alumínio	=	648,9 KgCO ₂ eq
ER Vidro	=	4025,187 KgCO ₂ eq
ER Papel	=	1655,317 KgCO ₂ eq

Fonte: Autoria própria, 2018.

Dentre os materiais que menos emitem gases do efeito estufa durante seu processo de reciclagem foram encontrados o alumínio e os plásticos em geral. Percebe-se que o processo de reciclagem envolve, na maioria dos materiais, apenas consumo de energia elétrica. Essa característica decorre do fato de grande parte dos processos de reciclagem dos materiais envolverem apenas atividades como lavagem, prensagem, trituração, extrusão, dentre outros, que costumam ser realizados por máquinas movidas à energia elétrica. Os demais processos de reciclagem são de origem físico-química, os quais não demandam usos energéticos.

A presente pesquisa reflete a importância da temática dos resíduos sólidos e das mudanças climáticas, principalmente a contribuição de empresas e cooperativas de catadores na redução dos gases do efeito estufa.

5.1 Valoração ambiental da reciclagem de resíduos

A valoração ambiental relacionou a reciclagem de resíduos sólidos à redução de emissões de CO₂ proporcionada por esse processo. A Tabela 12 sintetiza a valoração ambiental da reciclagem, com base na redução das emissões de CO₂. Os dados são

apresentados em quilograma de CO₂ equivalente por tonelada de material.

Tabela 12 - Valor Ambiental da Reciclagem (RE) (KgCO₂eq t⁻¹)

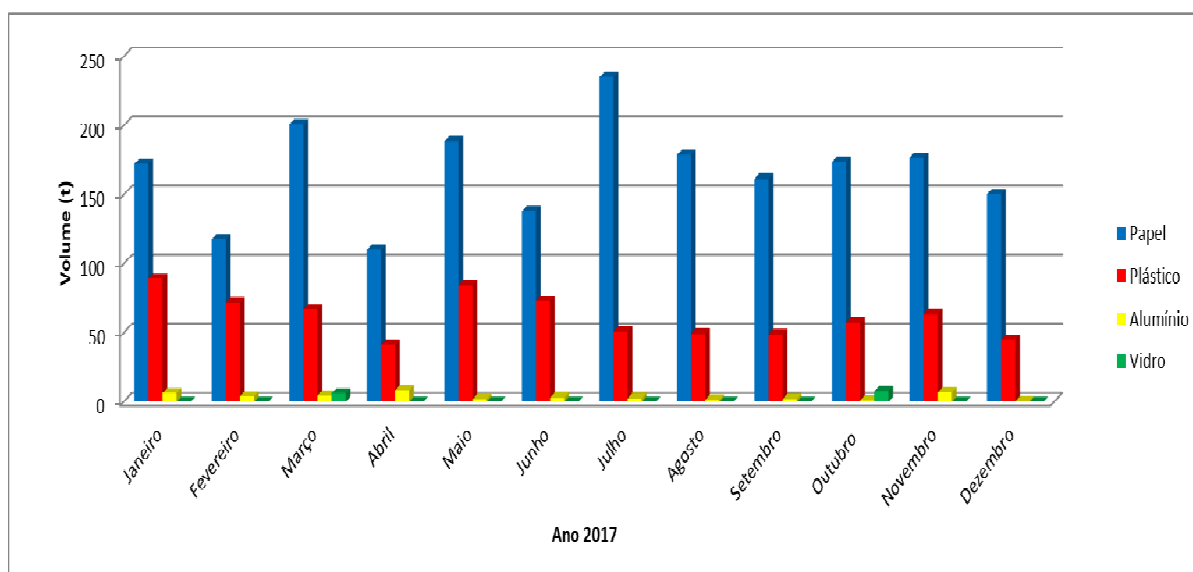
Material	BE	ER	RE
Plástico	5313,96	1334,88	3979,08
Alumínio	16949,92	648,9	16301,02
Vidro	4334,346	4025,187	309,1591
Papel	6880,191	1655,317	5224,874

Fonte: Autoria própria, 2018.

Pertinente lembrar que os dados podem e devem ser revistos ao longo do tempo, todavia novas tecnologias são desenvolvidas, tanto no tocante à eficiência energética como na redução do consumo de combustíveis fósseis.

Observa-se que o alumínio é o material cuja reciclagem mais contribui para a redução de emissões de CO₂. Tal fato deriva do alto consumo energético para sua produção, ao mesmo tempo em que sua reciclagem demanda poucos recursos energéticos para ser realizada. Para obter a estimativa da redução dos GEEs decorrente da reciclagem é feito um cálculo, a partir da quantidade de cada tipo de resíduo que foi comercializado pela empresa e assim tendo a destinação ambientalmente correta, multiplicando cada resíduo destinado pelo respectivo valor ambiental de sua reciclagem, conforme dados da Tabela 13 e Figura 1, no ano de 2017.

Figura 1 – Volume total do materiais comercializados, 2017.



Fonte: Autoria própria, 2018

A distribuição dos grupos evidência que o papel representa a maior porcentagem 71,52%, de todo material reciclado comercializado, depois temos, plástico 26,47%, metal 1,5% e vidro 0,49%.

Tabela 13 - Emissões evitadas pela reciclagem estudada

	Plástico	Alumínio	Vidro	Papel
Quantidade Destinada (t)	741,84	42,06	14	2.004,55
Valor Ambiental da Reciclagem (KgCO₂ t⁻¹)	3.979,08	16.301,02	309,16	5.224,87
Emissões Evitadas (KgCO₂)	2.951.840,70	685.620,90	4.328,24	10.473.513,16

Fonte: Autoria própria, 2018.

A valoração ambiental da reciclagem demonstra que aproximadamente 14.115.303,01 toneladas de dióxido de carbono deixaram de ser emitidas na atmosfera no ano de 2017. Assim sendo, a valoração ambiental envolvendo a reciclagem relaciona cada resíduo à redução das emissões de GEEs que a sua reciclagem proporciona.

6. CONCLUSÕES

A valoração ambiental aqui estudada visa relacionar a reciclagem dos resíduos à redução de emissões de CO₂, a reciclagem reintroduz o material na cadeia produtiva, gerando economia de energia e combustíveis, diminuindo os impactos ambientais na extração de mais recursos naturais, aumento da vida útil do aterro, renda aos atores envolvidos e reduz as emissões de GEEs.

Foram destinados ambientalmente de acordo com os 4 grupos apresentados, 741,84 t de plásticos, 42,06 t de alumínio, 14 t de vidros: 14 t e 2.004,55 t do grupo papel, somando os grupos, deixaram de ser enviados aos aterros sanitários, bem como aproveitados na cadeia produtiva 2.802,45 t de materiais recicláveis.

O resultado chamado de Valor Ambiental da Reciclagem de cada grupo foi de: Plástico: 3.979,08 KgCO₂ t⁻¹; Alumínio: 16.301,02 KgCO₂ t⁻¹; Vidro: 309,16 KgCO₂ t⁻¹ e Papel: 5.224,87 KgCO₂ t⁻¹.

Foi observado que no estudo o Papel é o resíduo cuja reciclagem mais contribui para a redução das emissões de CO₂, 10.473.513,16Kg de CO₂; seguido do plástico 2.951.840,7 kg de CO₂; Alumínio 685.620,9 Kg de CO₂ e Vidro 4.328,24 Kg de CO₂. Tal fato deriva da alta comercialização do grupo Papel e Plástico no caso estudado. Quando se observa o

montante, são 14.115.303,01 Kg de CO₂ evitados. Adequado lembrar que mesmo os grupos papel e plástico apresentando valores maiores na redução das emissões, o valor ambiental da reciclagem em KgCO₂ t⁻¹ do alumínio é significativamente superior aos demais.

Os resultados da valoração ambiental da reciclagem com vistas às reduções de emissões de CO₂ demonstram a importância de se avaliar a prática da reciclagem considerando todas as suas variáveis energéticas, tanto o consumo de energia elétrica como o de combustíveis fósseis, contribuindo na mitigação nos impactos ambientais, conseqüentemente os climáticos.

REFERÊNCIAS

BARTON, J. R.; ISSAIAS, I.; STENTIFORD, E. I. Carbon – making the right choice for waste management in developing countries. **Waste Management**, v. 28, n. 4, p. 690-698, 2008.

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel. **Relatório de Sustentabilidade 2010**. São Paulo, 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: DOU de 3/8/2010.

CALDERONI, S. **O\$ bilhões\$ perdido\$ no lixo**. 4ª edição, São Paulo: Humanitas/USP, 2003.

CARVALHO JR., J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007. 176p.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Manual de Capacitação: Mudança climática e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo**. Brasília, 2010.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: < https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em: nov. 18.

GODECKE, M. V.; NAIME, R. H.; FIGUEIREDO, J. A. S. O consumismo e a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Cascavel, v. 8, nº 8, p. 1700-1712, set/dez, 2012.

GRIPPI, S. **Lixo**: Reciclagem e sua História: Guia para as prefeituras brasileiras. Rio de Janeiro: Interciência, 2ª ed., 2006, 166p.

GUTBERLET, J. Informal and cooperative recycling as a poverty eradication strategy. **Geography Compass**, v. 6, n. 1, p. 19-34, 2012.

GUTBERLET, J.; JAYME, B. O. A história do meu rosto: como agentes ambientais percebem a estigmatização (re)produzida pelo discurso. **Geografia em Questão**, v. 5, n. 2, p. 183-200, 2012.

IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Vol. 2, 2006.

KING, M. F.; GUTBERLET, J. Contribution of cooperative sector recycling to greenhouse gas emissions reduction: a case study of Ribeirão Pires, Brazil. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2771-2780, Dec. 2013. doi: 10.1016/j.wasman.2013.07.031

KING, M. F.; GUTBERLET, J.; SILVA MOREIRA, D. da. In: PEREIRA, B. C. J.; GOES, F. L. **Contribuição de cooperativas de reciclagem para a redução de emissão de gases de efeito estufa**. Rio de Janeiro: IPEA: CMR, 2016. p. 507-536.

LIMA, G. C. G. de. **Modelo de valoração ambiental da reciclagem de resíduos sólidos urbanos**. 2012. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, CTG, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 2012.

NAJAM, A.; RAHMAN, A.A.; HUQ, S.; SOKONA, Y. Integrating sustainable development into the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Policy**, v. 3, p. 9-17, 2003.

MC - Ministério das Cidades. **Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS) Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2016, 2018**. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnosticoresiduos-solidos/diagnostico-rs-2016>>. Acesso em: mar. 2018.

MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Fatores de Emissão de CO₂ para utilizações que necessitam do fator médio de emissão do Sistema Interligado Nacional do Brasil, 2017**. Disponível em: <www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/...co2/Despacho-2017.xlsx>. Acesso em out. 17.

MME - Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário Estatístico 2011**: Setor de Transformação de Não Metálicos. Brasília: SGM, 2011.

PEREIRA, A. S.; OLIVEIRA, L. B.; REIS, M. M. Emissões de CO₂ Evitadas e Outros Benefícios Econômicos e Ambientais Trazidos pela Conservação de Energia Decorrente da Reciclagem de Resíduos Sólidos no Brasil. In: **Anais...** III Encontro Nacional da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica; 1999; Recife [CD-ROM].

SILVA LUIZ, C. da; FUGII, G. M.; SANTOYO, A. H.; BIERNASKI, I.; MYSZCZUK, A. N. In: FREITAS, Luciana; BESEN, Gina Rizpah; JACOBI, Pedro Roberto. **Indicadores multidimensionais da Política Municipal da Gestão Integrada de resíduos sólidos urbanos das capitais brasileiras: um panorama de 2008 a 2014**. São Paulo: IEE USP: OPNRS, 2017. p. 34-35.

UNFCCC - United Nations Framework Convention Climate Changes. **SSC CDM Approves Methodology AMS-III.AJ**. United Nations, 2011.

US EPA - United States Environmental Protection Agency. **Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks**. 3^a ed. 2006.

VLACHOPOULOS, J. An Assessment of Energy Savings Derived from Mechanical Recycling of Polyethylene Versus New Feedstock Version 3.2. World Bank, 2009.