

Artigo Técnico

Avaliação do ciclo de vida da coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa, município de João Pessoa (PB), Brasil

Life Cycle Assessment of Selective Paper and Cardboard Collection of in the Bessa Nucleus, municipality of João Pessoa/Paraíba, Brazil

Claudia Coutinho Nobrega^{1*} , Monica Carvalho¹ , Hozana Raquel de Medeiros Garcia² , Valeria Ibáñez Forés³ , Maria Dolores Bovea³ 

RESUMO

Reconhecendo que o papel e o papelão são os materiais mais identificados na gestão dos resíduos sólidos domiciliares (RSD), o objetivo deste artigo foi aplicar a metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) aos procedimentos de coleta seletiva desses materiais em um núcleo de João Pessoa (PB). A ACV quantifica as cargas ambientais ao longo do ciclo de vida de uma atividade e está normatizada pela International Organization for Standardization (ISO) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essa avaliação considerou todas as fases do sistema de gestão dos RSD: coletas regular e seletiva, reciclagem, disposição final e transportes intermediários. Utilizou-se o *software* SimaPro, com a base de dados Ecoinvent, e o método de avaliação de impacto ambiental CML-IA *baseline*, versão 3.00/World 2000. Verificou-se que, em 2014, a coleta seletiva incluiu 11% dos RSD gerados nos distritos servidos pela unidade de triagem. O restante (89%) foi, em sua maioria, transportado e destinado ao Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa. Interpretando os resultados da ACV para as diferentes categorias de impacto, verificou-se que a reciclagem traz grandes benefícios ambientais quando consideradas as emissões atmosféricas associadas à eutrofização, ao aquecimento global e à oxidação fotoquímica. Nesses casos, obteve-se um resultado geral negativo nas emissões, por causa da reciclagem, em comparação às outras etapas consideradas (coletas seletiva e regular, consumos de energia nos galpões, Central de Triagem – CT –, transportes e aterro sanitário). Para as emissões atmosféricas associadas à destruição da camada de ozônio e à acidificação, as emissões negativas relacionadas à reciclagem não foram suficientes para obter um balanço geral negativo.

Palavras-chave: avaliação de ciclo de vida; impactos ambientais; resíduos sólidos domiciliares; coleta seletiva, reciclagem.

ABSTRACT

Recognizing that paper and cardboard are the most common materials in Solid Household Waste (SHW) management, the objective of the study presented herein was to apply the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to the procedures associated with the selective collection of paper and cardboard in a nucleus in João Pessoa, Paraíba. LCA quantifies the environmental loads throughout the life cycle of an activity and is standardized by the International Organization for Standardization (ISO) and the Brazilian Association of Technical Standards (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT). LCA considered all the phases of SHW management: regular collection, selective collection, recycling, final disposal and intermediate transportation. The SimaPro software was used, with the Ecoinvent database and CML-IA baseline environmental assessment method, version 3.00/World 2000. In 2014, it was verified that selective collection included 11% of the SHW generated in the districts served by the sorting unit. The remainder (89%) was, in its majority, transported and destined for the Metropolitan Sanitary Landfill of João Pessoa. Interpretation of the LCA results for the different impact categories revealed that recycling brings positive environmental benefits when the atmospheric emissions associated with eutrophication, global warming and photochemical oxidation were considered. An overall negative value was obtained for these categories, due to recycling, in comparison with the other analyzed phases (selective collection, regular collection, consumption of energy in the sheds, sorting unit, transportation and landfilling). For atmospheric emissions associated with depletion of the ozone layer and acidification, negative emissions associated with recycling were not sufficient to produce an overall negative balance.

Keywords: life cycle assessment; environmental impacts; solid household waste; selective collection; recycling.

¹Universidade Federal da Paraíba – João Pessoa (PB), Brasil.

²Universidade Federal do Ceará – Fortaleza (CE), Brasil.

³Universitat Jaume I – Castellón de la Plana, Espanha.

*Autor correspondente: claudiacnobrega@hotmail.com

Recebido: 11/05/2018 – Aceito: 31/07/2019 – Reg. ABES: 197802

INTRODUÇÃO

A problemática ambiental contemporânea está diretamente relacionada com a produção de resíduos sólidos domiciliares (RSD) provenientes das atividades desempenhadas em ambientes urbanos, compostos das frações úmidas (matéria orgânica) e secas (plástico, metais, vidros, papel, papelão etc.). Esses dois últimos materiais não orgânicos (papel e papelão), os quais, segundo Hoornweg e Bhada-Tata (2012), possuem como maiores fontes geradoras as residências e os comércios, serão o foco do estudo aqui apresentado.

A coleta seletiva apresenta-se como uma possível medida de reincorporação do material passível de reciclagem no setor produtivo, e a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser aplicada para identificar os indicadores ambientais categóricos da eficácia e da viabilidade do programa (BOVEA *et al.*, 2010; IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2018).

De acordo com Hoornweg e Bhada-Tata (2012) e o World Energy Council (2016), os resíduos orgânicos compreendem a maior parte dos RSD no mundo, com 46%, seguidos pelo papel, com 17%. Karak, Bhagat e Bhattacharyya (2012) fazem uma extensa compilação da composição dos RSD em diferentes regiões do mundo, por país, e concluem que a imensa geração de RSD não é somente uma ameaça ambiental, é também uma causa de grandes obstáculos sociais.

No Brasil, a composição gravimétrica dos RSD mostra que a presença de papel e papelão compreende 15%, perdendo apenas para a fração orgânica (52,6%) (LUZ *et al.*, 2015). Esses materiais compõem uma das principais atividades de reciclagem, juntamente com o alumínio e o plástico (ABRELPE, 2013). No município de João Pessoa (PB), a quantidade de matéria orgânica e resíduos verdes corresponde a 51% dos RSD coletados, enquanto a fração referente a resíduos potencialmente recicláveis é de 25%, dos quais 9% são papel e papelão (MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA, 2014).

Ao considerar o papel e o papelão como os materiais mais identificados na gestão dos RSD em níveis mundial, nacional e local, este artigo tem por objetivo aplicar a metodologia da ACV aos procedimentos da coleta seletiva de papel e papelão realizada pela Associação de Catadores de Resíduos de João Pessoa (ASCARE/JP) — Núcleo do Bessa, no município de João Pessoa (PB), Brasil.

METODOLOGIA

Caracterização da área estudada

A presente pesquisa possui como unidade empírica de referência o Núcleo do Bessa, localizado no município de João Pessoa, que apresenta uma população estimada de 800.323 habitantes, área territorial de 211,475 km² e densidade territorial de 3.421,28 hab.km⁻² (IBGE, 2017). É constituído por 64 bairros, dentre os quais se identificam:

Bessa, Aeroclube, Jardim Oceania e parte do Manaíra, que compõem o Núcleo do Bessa, destacado na Figura 1, local onde foi realizada a pesquisa e que tem uma população de 51.212 habitantes e 16.701 domicílios (IBGE, 2010).

Esse município dispõe de serviços de limpeza urbana sob a responsabilidade da Autarquia Municipal Especial de Limpeza Urbana (EMLUR). A coleta seletiva atende a 18 bairros, dentre eles os supracitados, escolhidos para a elaboração deste estudo de caso (MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA, 2014) devido a sua quantidade de materiais passíveis de reciclagem que são coletados mensalmente pela ASCARE/JP — Bessa (Figura 2).

Caracterização do sistema de gestão de resíduos do município

A Figura 3 mostra o sistema de coleta seletiva do município de João Pessoa, a qual começa com a segregação do material passível de reciclagem pelos moradores em suas residências (A), geralmente em seco e úmido (A1 e A2). Os resíduos a serem reciclados são dispostos aos catadores (ASCARE/JP — Bessa) (B), os quais, então, os encaminham para um galpão onde ocorre a separação em papel, papelão, metal, vidro e borracha (C). Em seguida, esses materiais são encaminhados para a comercialização (D). Essa etapa é realizada por agentes intermediários (atravessadores/sucateiros) do processo, que compram dos catadores e revendem à indústria recicladora, a qual, após essa aquisição, o converte em outro produto.

Esses agentes intermediários existem devido à dificuldade dos catadores de se organizarem para vender diretamente à indústria, além da falta de infraestrutura necessária.

Avaliação de Ciclo de Vida

A ACV está normatizada internacionalmente pela International Organization for Standardization (ISO) em suas normas ISO 14.040 (ISO, 2006a) e ISO 14.044 (ISO, 2006b), as quais, no Brasil, foram traduzidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas nas NBR 14040 (ABNT, 2014a) e 14044 (ABNT, 2014b). Essa avaliação apresenta quatro etapas inter-relacionadas, descritas a seguir.

Definições do objetivo e do escopo

As definições do objetivo e do escopo são fundamentais na interpretação dos resultados e para a ACV (FINNVEDEN *et al.*, 2009; LAURENT *et al.*, 2014). Portanto, a finalidade da aplicação dessa metodologia é avaliar o impacto ambiental associado ao ciclo de vida do programa de coleta seletiva do papel e do papelão realizado no Núcleo do Bessa, no município de João Pessoa.

A fronteira foi delimitada contemplando as seguintes etapas: coleta e transporte do material (papel/papelão) das residências até o núcleo da ASCARE/JP — Bessa e dos domicílios até a Central de Triagem (CT); separação dos resíduos no galpão do núcleo pelos catadores e na CT, bem como sua preparação para comercialização; venda dos materiais aos atravessadores; e sua

revenda às indústrias de reciclagem da região. Pode-se considerar este estudo como portão-ao-portão, do tipo em que o local está geograficamente especificado e processos fora dos portões do local definido não estão incluídos.

A unidade funcional (UF) deste estudo, à qual estão relacionadas todas as entradas e saídas de matéria e energia, foi uma tonelada de RSD por habitante-ano na unidade de triagem, conforme sugerido por

Ibáñez-Forés (2009). A Figura 4 mostra o escopo do estudo, aplicado à coleta seletiva de papel e papelão, no núcleo do Bessa.

Inventário do Ciclo de Vida

Esta etapa consiste em coleta dos dados e procedimentos de cálculos para quantificar as entradas (energia, matéria-prima, recurso

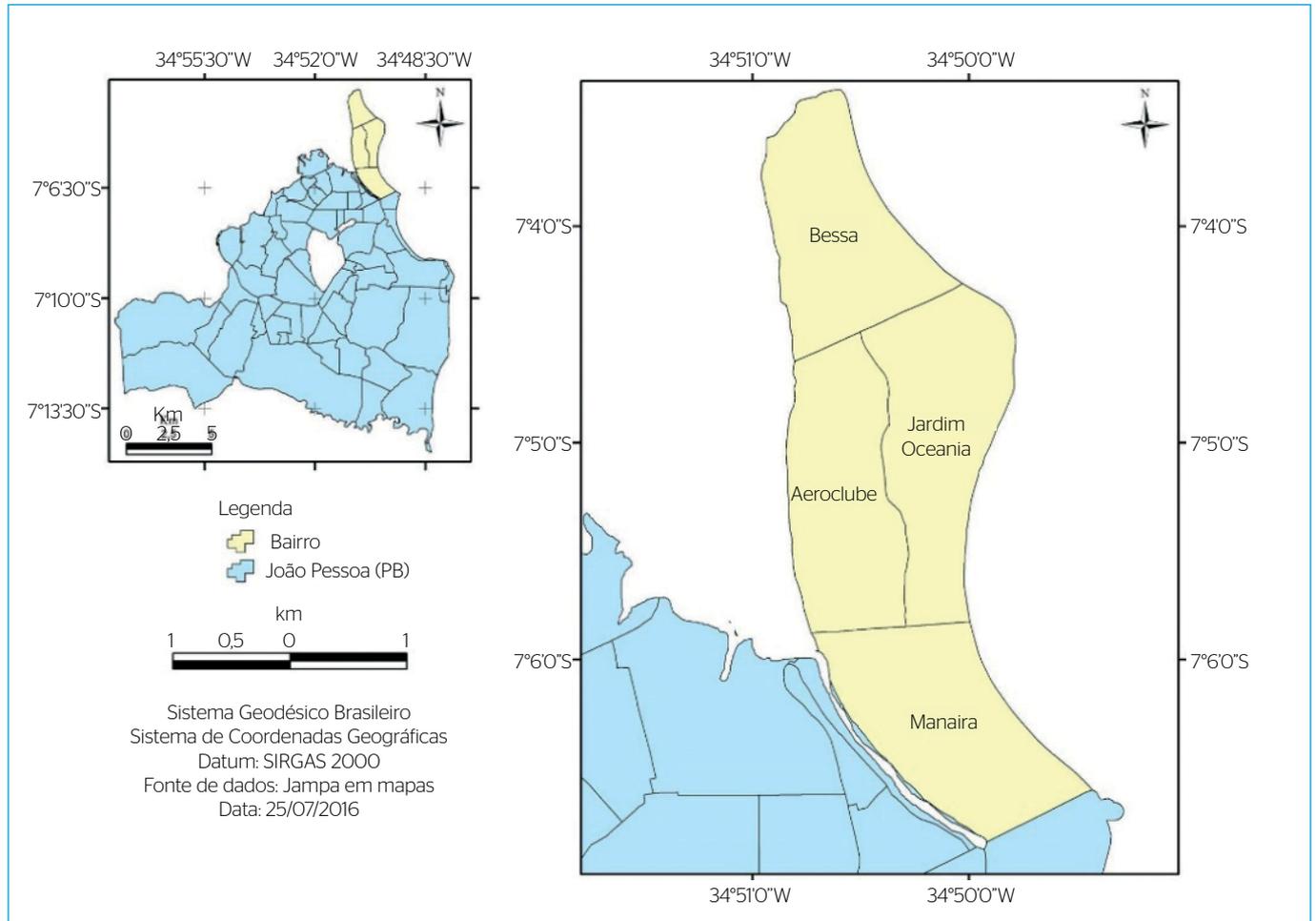


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

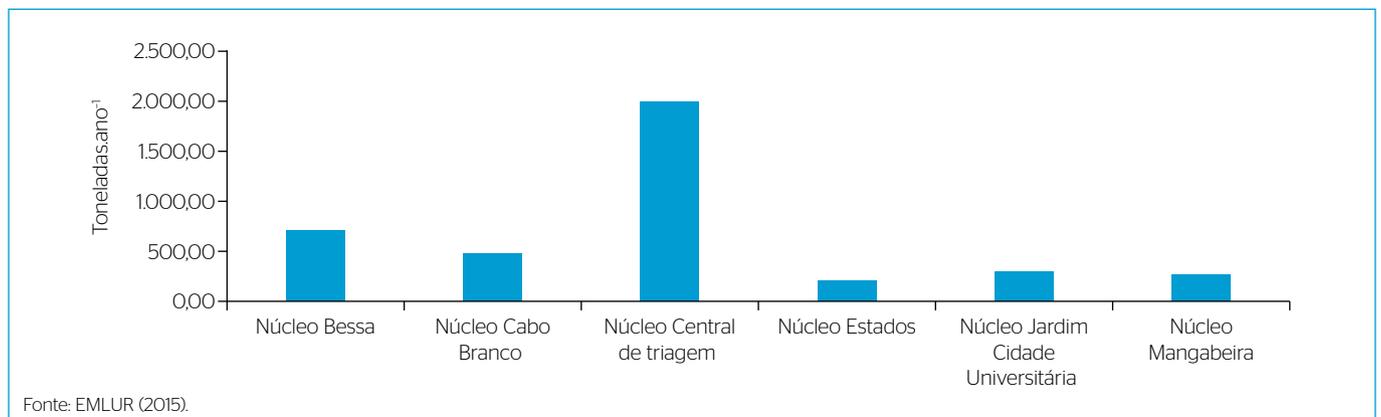


Figura 2 - Distribuição da quantidade coletada de material reciclável em João Pessoa por núcleo de coleta seletiva em 2014.

hídrico, entre outras) e saídas (emissões atmosféricas, descargas para o solo e água etc.) do sistema. O *software* SimaPro, versão 8.0 (PRÉ CONSULTANTS, 2013), foi utilizado para o desenvolvimento da ACV, selecionando-se a base de dados Ecoinvent 3.2 (ECOINVENT CENTRE, 2014) para representar os processos de matéria e energia associados à UE. No caso em que não havia um processo brasileiro disponível, a versão existente foi adaptada considerando-se distâncias e meios de transporte utilizados no Brasil.

Dos processos disponíveis na Ecoinvent 3.2, escolheram-se aqueles com a denominação *allocation default* (alocação padrão), que segue a abordagem atribucional em que as cargas são atribuídas proporcionalmente aos processos específicos (ECOINVENT CENTRE, 2014). A ACV atribucional é utilizada para contabilizar e atribuir a um produto fabricado num dado momento uma parcela das emissões totais de poluentes e do consumo de recursos na economia (WEIDEMA;

EKVALL; HEIJUNGS, 2009), com o objetivo final de aperfeiçoar os sistemas estudados (WEIDEMA, 2003).

Para elaborar o ICV da coleta seletiva do papel e do papelão do núcleo do Bessa, foi necessário:

- identificar a quantidade de resíduos gerados no núcleo e sua distribuição dentro dos três possíveis destinos (coleta seletiva, CT e aterro sanitário);
- quantificar e distribuir a geração de RSD, do núcleo do Bessa, por tipo de material (papel ou papelão), correspondente à coleta seletiva e à CT;
- identificar a composição final da reciclagem correspondente ao Núcleo de Coleta Seletiva do Bessa e à CT;
- quantificar os consumos de água, eletricidade e diesel, correspondentes ao núcleo estudado e à CT, ao galpão do atravessador e à indústria recicladora — todos esses dados (a, b, c e d) foram disponibilizados pela EMLUR (2014);

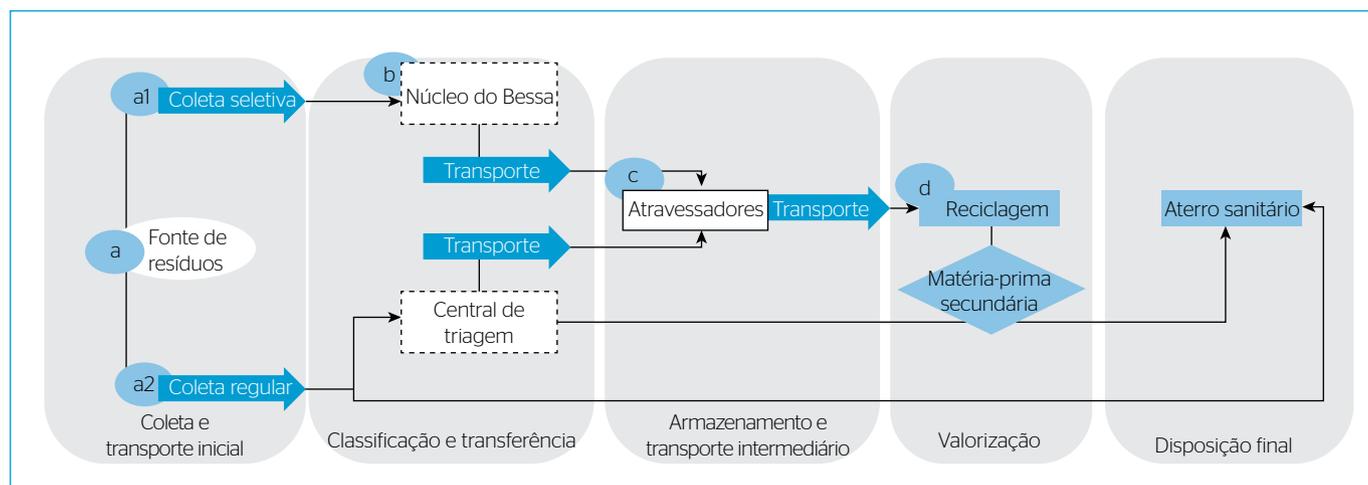


Figura 3 - Sistema de gestão de resíduos sólidos domiciliares de João Pessoa por núcleo de coleta seletiva em 2016.

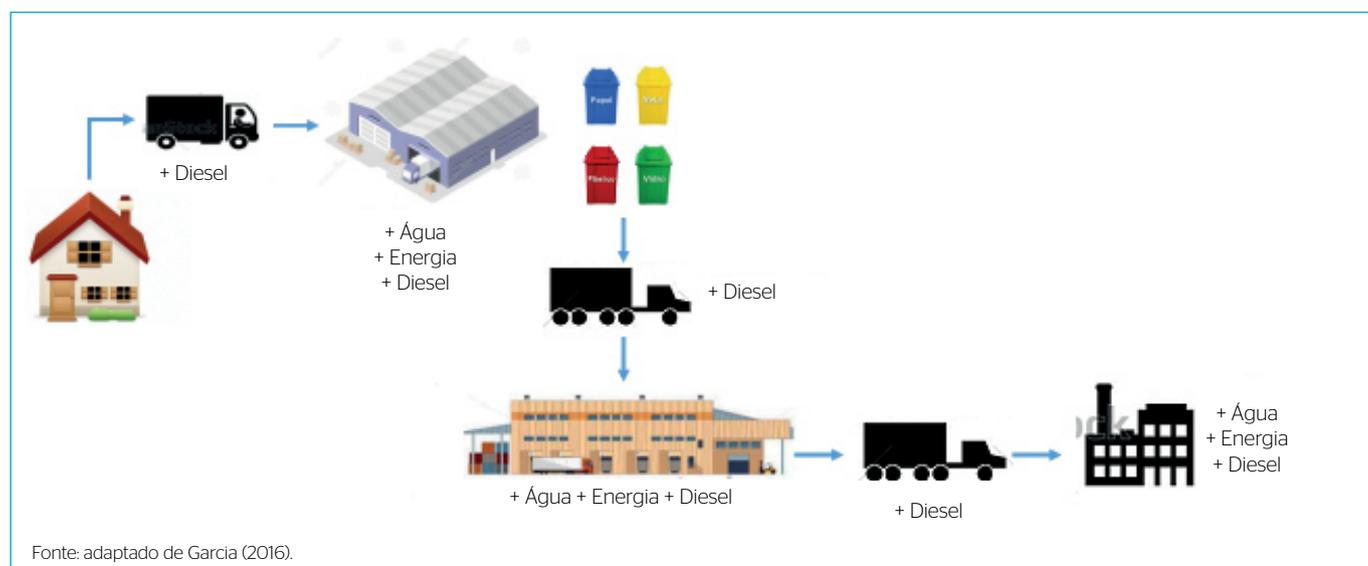


Figura 4 - Escopo do estudo aplicado à coleta seletiva de papel e papelão, no núcleo do Bessa, em João Pessoa.

- atribuir um percentual de eficiência do material, que se refere à quantidade de resíduos coletados que podem ser vendidos para os agentes intermediários e revendidos para a indústria recicladora — considerou-se 89% para o papel e o papelão (ARENA *et al.*, 2004) e quantificou-se a quantidade de material vendido para os atravessadores, levando em consideração tal percentual;
- quantificar o consumo de diesel nos transportes utilizados na coleta seletiva, a partir das informações disponibilizadas pela EMLUR e pelos atravessadores — considerou-se a quilometragem da rota total realizada pelos veículos. O processo selecionado foi o *Diesel, low sulphur, at regional storage*, que considera a extração da matéria-prima, seu processamento e seu transporte até os tanques regionais de estoque. O processo selecionado para o consumo de energia das máquinas, luzes, balança digital, etc. foi o mesmo do item anterior. Para o consumo de eletricidade, adaptou-se o processo *Electricity, low voltage, at grid, BR*, considerando a composição: hidroelétrica, 67,4%; gás natural, 13,0%; biomassa, 5,2%; óleo e derivados, 5,1%; carvão e derivados, 4,8%; nuclear, 2,5%; e eólica, 2% (BRASIL, 2016). Para o consumo de água, selecionou-se *Tap water, at user*, que é disponível na rede pública e inclui os processos de captação, distribuição e tratamento.

O Quadro 1 mostra o resumo do item de Inventário de Ciclo de Vida (ICV).

Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Após a construção do ICV, procede-se a escolha de um método de ACV. A avaliação de impacto analisa os efeitos humanos e ecológicos da

Quadro 1 – Etapas analisadas para o Inventário de Ciclo de Vida.

Etapas	Descrição
Coleta seletiva (CS)	Coleta de resíduos passíveis de reciclagem, realizada por catadores com auxílio do caminhão da ASCARE – Bessa.
Coleta regular (CR)	Coleta regular dos resíduos domiciliares não segregados em seco e úmido, utilizando o caminhão compactador da EMLUR.
Núcleo e galpão (N&G)	Consumos de água, eletricidade e diesel associados às atividades desenvolvidas no núcleo do Bessa e nos galpões dos atravessadores.
Central de triagem (CT)	Consumos de água, eletricidade e diesel associados às atividades desenvolvidas na CT.
Aterro sanitário (AS)	Consumos de água, eletricidade e diesel associados às atividades desenvolvidas no AS.
Transporte (T)	Consumo de diesel no transporte dos resíduos do núcleo e do CT até o atravessador e deste até a indústria recicladora.
Reciclagem (R)	Consumos de água, eletricidade e diesel associados às atividades de reciclagem.

Fonte: adaptado de Garcia (2016).

utilização de energia, água, materiais e descargas ambientais identificadas na análise do inventário. Nesta etapa, utilizou-se o método CML-IA *baseline*, versão 3.00/World 2000 (GUINÉE *et al.*, 2002; CML, 2016), que corresponde à metodologia mais utilizada para avaliar impactos ambientais do ciclo de vida de sistemas de gestão de resíduos sólidos (LAURENT *et al.*, 2014).

Entre as categorias de impacto disponibilizadas pelo método CML-IA *baseline* versão 3.00/World 2000 (GUINÉE *et al.*, 2002; CML, 2016), selecionaram-se acidificação, eutrofização, aquecimento global, destruição da camada de ozônio e oxidação fotoquímica. Essas categorias de impactos foram selecionadas para facilitar a comparação com a literatura científica existente (BOVEA *et al.*, 2010).

As substâncias acidificantes causam uma ampla gama de impactos no solo, nos aquíferos, nos organismos, nos ecossistemas e nos materiais (edifícios). O potencial de acidificação para emissões atmosféricas é calculado por meio do modelo adaptado do RAINS 10, descrevendo a deposição de substâncias acidificantes. A acidificação é expressa em kg SO₂-eq, e sua escala geográfica varia entre local e continental.

A eutrofização ocorre a partir da contaminação dos recursos hídricos por nutrientes provenientes da decomposição de resíduos. Ela é caracterizada pelo aumento desmesurado de nutrientes, principalmente em meios aquáticos, suscitando o crescimento populacional de alguns organismos, *e.g.*, algas, e é expressa em kg PO₄-eq. Ademais, causa diminuição da concentração de oxigênio nos meios receptores.

O aquecimento global pode resultar em efeitos adversos sobre a saúde dos ecossistemas e dos humanos e está relacionado às emissões de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera. O modelo de caracterização, desenvolvido pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), foi selecionado para a formação dos fatores de conversão, que expressam o potencial de aquecimento global para um horizonte temporal de 100 anos, em kg CO₂-eq. O escopo geográfico desse indicador é global.

Por causa da depleção da camada de ozônio, uma maior porcentagem de radiação UV-B alcança a superfície terrestre. Há possíveis efeitos danosos às saúdes humana e animal, aos ecossistemas aquáticos e terrestres, aos ciclos bioquímicos e nos materiais. Essa categoria possui escala global. O modelo de caracterização foi desenvolvido pela World Meteorological Organization (WMO) e define o potencial de depleção da camada de ozônio para diferentes gases, expresso em kg CFC-11-eq. O escopo geográfico é global.

A oxidação fotoquímica corresponde à formação de substâncias reativas (principalmente ozônio), que são danosas à saúde humana e à dos ecossistemas, que também podem afetar cultivos. O potencial de criação fotoquímica de ozônio para emissões atmosféricas é calculado com base no modelo UNECE *Trajectory* e está expresso em kg C₂H₄-eq. O escopo geográfico varia entre local e continental.

Interpretação dos resultados da Avaliação de Ciclo de Vida

Por fim, a interpretação avalia os resultados da análise do inventário. Dos resultados dessa etapa, podem ser tiradas as conclusões e recomendações quanto às tomadas de decisão.

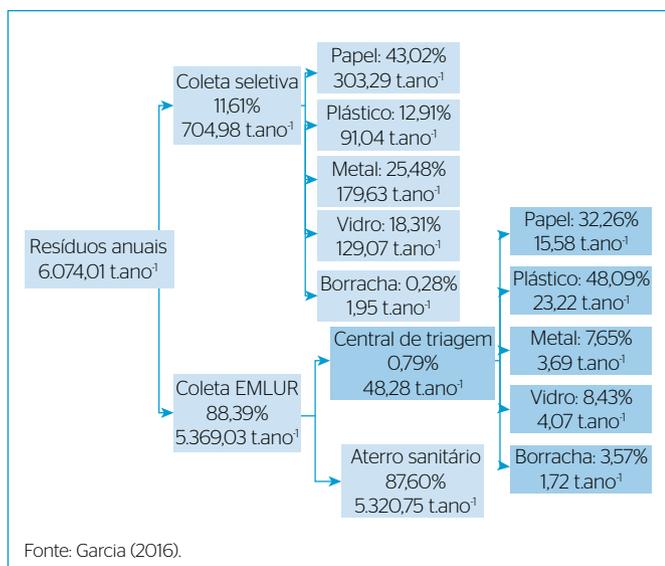
RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ano de 2014, foram coletados 6.074 t de RSD no núcleo do Bessa. Desse total, observou-se que apenas 11,61% foram encaminhados para a coleta seletiva. Esse valor representa mais do que a média nacional de 2010, que foi de 2,4% (IPEA; BRASIL, 2010). Para a coleta regular, a média nacional foi de 97,6% (IPEA; BRASIL, 2010), enquanto no núcleo do Bessa essa porcentagem foi 88,39%.

Um fator positivo da gestão dos RSD no núcleo do Bessa consiste na disposição final em aterro sanitário, que chegou a 87,60% (Figura 5). Dado que a média nacional, em 2014, foi de 58,40% dos RSD gerados, a do núcleo do Bessa encontra-se bem acima da nacional (ABRELPE, 2016).

Ao conhecer a quantidade e a distribuição da geração de RSD do Bessa, outra informação também foi considerada para a elaboração do ICV: a quantidade de papel e papelão correspondente à coleta seletiva e à CT. Identificaram-se 295,71 t.ano⁻¹ e 15,19 t.ano⁻¹ para papel e papelão, respectivamente, após aplicação do percentual de eficiência.

Quatro esferas industriais — papel e papelão; plástico; metal; e vidro — possuem considerável colaboração nas atividades de reciclagem no Brasil (ABRELPE, 2013). Verificou-se que os maiores índices de reciclagem no núcleo do Bessa e na CT são provenientes de papel e



Fonte: Garcia (2016).

Figura 5 - Fluxograma dos resíduos sólidos domiciliares do município de João Pessoa em 2014.

papelão (73,40%). Esse valor difere da média nacional, que, de acordo com a ABRELPE (2014), para o ano de 2012, foi de 45,7% para o papel.

Sobre a quantidade de diesel consumida por tonelada de resíduo transportado, a ASCARE/JP — Bessa dispõe de um caminhão tipo baú 3 × 4, com capacidade para transportar 4 t de resíduos. O consumo de diesel para esse caminhão foi de 25,63 L.t⁻¹ de resíduos transportados da origem (rotas de coleta nos bairros referentes a todos os materiais recicláveis coletados) até o galpão do núcleo.

O caminhão do atravessador é um Mercedes-Benz[®] 1113, com capacidade para transportar 11 t de resíduos. Para cada tipo de material transportado, existe um atravessador responsável por sua comercialização. O consumo de diesel para transportar o papel e o papelão do núcleo até o galpão do atravessador foi de 0,458 L.t⁻¹. Para a viagem entre a CT e o agente intermediário, considerou-se 0,767 L.t⁻¹. Para o transporte final (do galpão do atravessador até a indústria recicladora), considerou-se o mesmo tipo de caminhão (Mercedes-Benz[®] 1113) e consumo de 6,280 L.t⁻¹.

Também foram contabilizados os consumos de energia (kwh.t⁻¹), água (kg.t⁻¹) e diesel (L.t⁻¹) associados ao galpão do núcleo ASCARE/JP — Bessa, à CT, ao galpão do atravessador e à indústria recicladora. Esses gastos por instalação estão dispostos na Tabela 1.

Os resultados obtidos para os fluxos de matéria e energia associados à UF foram inseridos no SimaPro 8.03 para construção do ICV. Utilizando-se a base de dados especificada e os processos previamente mencionados, selecionou-se o método para avaliação das cargas ambientais.

Tabela 1 - Consumo de água, eletricidade e diesel, por instalação, em 2014.

Instalação	Recursos	Consumo
Galpão do núcleo de coleta ¹	Água	766,023 kg.t ¹
	Eletricidade	8,301 kWh.t ¹
	Diesel	0 L.t ¹
Galpão de intermediários ²	Água	0 kg.t ¹
	Eletricidade	0 kWh.t ¹
	Diesel	0 L.t ¹
Central de Triagem	Água	1.072,984 kg.t ¹
	Eletricidade	45,878 kWh.t ¹
	Diesel	0 L.t ¹
Indústrias de reciclagem		
Papel e papelão	Água	2.000 kg.t ¹
	Eletricidade	750 kWh.t ¹
	Diesel	0 L.t ¹

¹Dados disponibilizados pela EMLUR (2015) a partir da apresentação das contas de água e energia do Galpão do Bessa referentes ao ano de 2014; ²considerou-se que o consumo de água, eletricidade e diesel foram nulos para o galpão dos intermediários, já que esses materiais são vendidos pelos coletores já devidamente preparados para revenda (não há necessidade de usar prensa ou outros equipamentos).

Na Figura 6, observa-se a quantidade de emissões de SO_2 provenientes de cada etapa do sistema de coleta seletiva de papel e papelão coletado pelo núcleo do Bessa, no município de João Pessoa.

Verifica-se, na Figura 6, que, apesar de a reciclagem evitar emissões de SO_2 na atmosfera, o quantitativo não foi suficiente para compensar os sistemas de coletas seletiva e regular de papel e papelão, no núcleo do Bessa, que emitem quantidades elevadas de SO_2 equivalentes. Destaca-se a contribuição do transporte dos materiais do núcleo para o galpão do atravessador e deste para a indústria de reciclagem, devido às emissões provenientes da queima do combustível do veículo transportador, que emite compostos como enxofre e azoto. Resultado similar foi obtido por Yay (2015), que identificou que os cenários de “aterro sanitário sem recuperação de energia” e “reciclagem e aterro sanitário” provocaram mais emissões devido ao transporte dos resíduos.

Os melhores resultados de Yay (2015) foram para os cenários que contemplavam reciclagem, compostagem e aterro sanitário. Arena *et al.* (2004) compararam três opções de gestão de resíduos de papel e papelão (aterro sanitário, reciclagem e combustão com recuperação de energia) na Itália e verificaram que a contribuição do aterro sanitário para a acidificação foi mais do que o dobro de outros cenários analisados.

Na gestão dos resíduos sólidos, o processo de eutrofização ocorre a partir da contaminação dos recursos hídricos por nutrientes provenientes da decomposição desses resíduos. Na Figura 7, podem-se analisar os impactos advindos de cada etapa da coleta seletiva do papel e do papelão do núcleo do Bessa para a categoria de impacto desse processo.

Diferentemente da categoria de impacto de acidificação, observa-se que, na eutrofização, a reciclagem de papel e papelão compensa as emissões das demais etapas, identificando os impactos mais expressivos

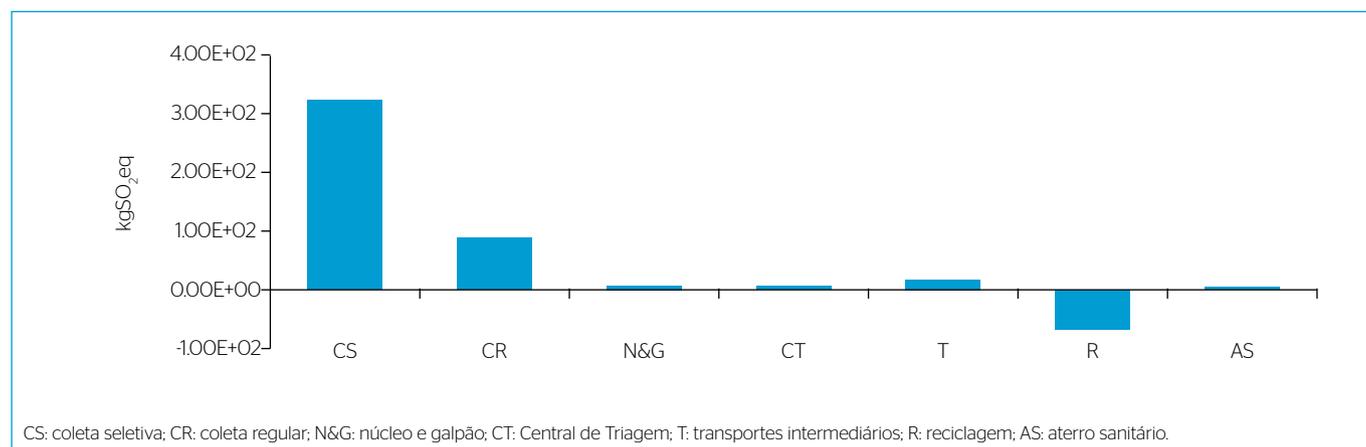


Figura 6 - Influência na acidificação nas diferentes etapas do sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos de papel e papelão no núcleo do Bessa em 2014 (indicador de categoria de impacto/unidade funcional).

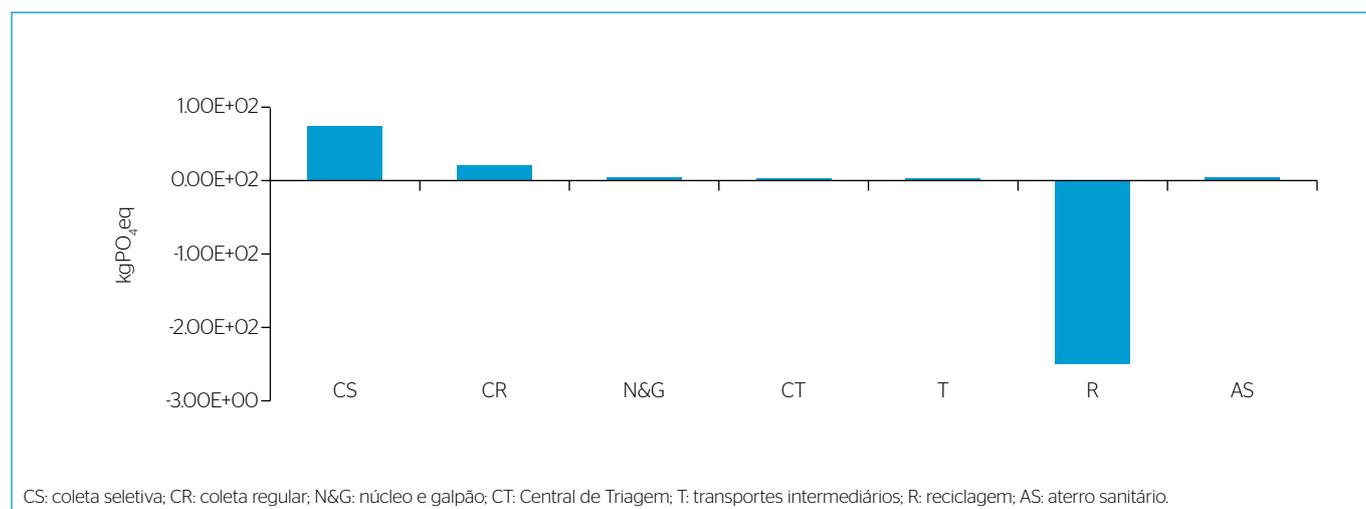


Figura 7 - Influência na eutrofização nas diferentes etapas do sistema de coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa em 2014 (indicador de categoria de impacto/unidade funcional).

advindos das coletas seletiva e regular. O resultado expresso na Figura 7 difere dos valores identificados por Alencar (2013) e Garcia (2016) para a mesma categoria de impacto na gestão dos resíduos sólidos quando são analisados todos os materiais passíveis de reciclagem (plástico, metal, vidro, borracha, papel e papelão), sobretudo, na etapa do aterro sanitário, na qual os autores observaram significativas emissões de PO_4 . Esse resultado decorre, provavelmente, da produção de lixiviado que contém produtos contaminantes que favorecem a eutrofização.

Com relação ao impacto aquecimento global, a Figura 8 mostra as emissões de GEE associadas à cada etapa da coleta seletiva de papel e papelão no núcleo estudado. Constatou-se, nessa figura, que a reciclagem não compensa as demais etapas do sistema de coleta seletiva, tendo em vista as quantidades de CO_2 eq emitidas, principalmente, no que se refere ao transporte dos resíduos (coletas seletiva e regular e transporte). O comportamento foi similar ao observado para a categoria de acidificação.

Sobre a contribuição do transporte para o aumento ou a redução de GEE, Sevigné-Itoiz *et al.* (2015) constataram, em seus estudos, que, quando 95% dos resíduos de papel coletados na Espanha eram reciclados no próprio país, havia um quantitativo de -317 kg CO_2 -eq evitados. Em contrapartida, quando 50% desses resíduos eram encaminhados para a reciclagem fora do país, o valor de emissões evitadas reduzia para -83 kg CO_2 -eq. Esses resultados foram atribuídos ao transporte internacional de resíduos da Espanha para os Países Baixos, que aumentava as emissões de GEE. Contudo, nos resultados apresentados por Arena *et al.* (2004) referentes à categoria aquecimento global, os autores destacaram que o cenário da reciclagem está associado a grandes quantidades de emissões, devido aos encargos, principalmente indiretos, a partir do sistema elétrico de fundo proporcionando energia e vapor utilizados no reprocessamento do papelão. Isso ocorreu porque a usina de reciclagem está localizada na Itália e, na época

da realização da investigação, a matriz energética do país era muito intensiva em carbono.

No trabalho realizado por Gemechu *et al.* (2013), que compararam a emissão de GEE para a produção do papel de seda a partir de celulose virgem (CV) e de resíduos de papel reciclado (RPR) desde a extração da matéria-prima até o destino final, o impacto proveniente do processo de reciclagem é menos intenso do que na CV. Isso ocorre por duas razões: o total de emissões de GEE advindo do RPR é mais baixo do que o da CV, devido a requisitos de energia e materiais relativamente mais baixos e à natureza do papel de seda não reciclado, já que este é o último uso da fibra. Portanto, a utilização do RPR como uma entrada seria preferível sobre o uso de CV. A reciclagem, de modo geral, contribui para a melhoria do desempenho ambiental no quesito GEE (DEUS; BATTISTELLE; SILVA, 2017).

Nos resultados aqui apresentados sobre a influência do aquecimento global nas diferentes etapas do sistema de coleta seletiva no núcleo do Bessa (Figura 8), constatou-se também que o aterro sanitário emite uma quantidade considerável de GEE. Segundo Yay (2015), em um contexto geral de gestão de RSD, isso se deve à falta de controle de emissões, sem a recuperação de energia. Na reciclagem, o metano emitido é parcialmente destruído, embora 30% desse gás seja liberado diretamente para a atmosfera como resultado das emissões fugitivas. Esse gás parcialmente destruído é contabilizado como emissões evitadas e, portanto, equivale positivamente para a análise do sistema de reciclagem.

Na Figura 9, pode-se avaliar a categoria de impacto de destruição da camada de ozônio, proveniente de cada etapa da coleta seletiva de papel e papelão do núcleo do Bessa. Nessa categoria de impacto, observa-se que a coleta seletiva de papel e papelão emite quantidades significativas de CFC^{11} eq, superiores inclusive às emissões evitadas pela reciclagem.

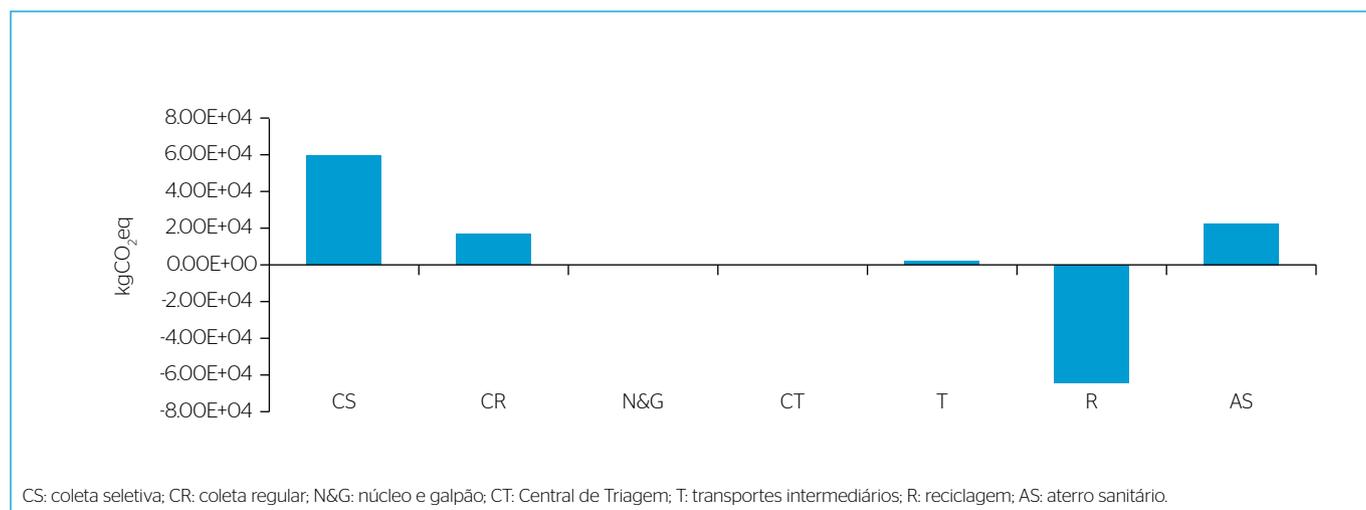


Figura 8 - Influência no aquecimento global nas diferentes etapas do sistema de coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa em 2014 (indicador de categoria de impacto/unidade funcional).

De acordo com Garcia (2016), esse resultado se deve ao consumo de combustível utilizado para transportar os resíduos tanto na coleta seletiva, como na regular e no transporte, sendo a reciclagem a principal atividade a evitar as emissões de CFC na atmosfera.

Já com relação à oxidação fotoquímica (Figura 10), para as diferentes etapas do sistema de coleta seletiva de papel e papelão no núcleo estudado, constata-se que a reciclagem de papel e papelão compensa as emissões de C_2H_4 na atmosfera, tendo em vista que seu valor foi de $-28,82 \text{ kg } C_2H_4 \text{ eq}$, resultado superior às demais etapas, que totalizaram $10,09 \text{ kg } C_2H_4 \text{ eq}$.

O efeito observado na Figura 10 difere dos apresentados por Garcia (2016) e Yay (2015), para os quais as emissões da reciclagem não compensaram as do aterro sanitário. Segundo Bovea *et al.* (2010), a recuperação energética do aterro sanitário reduziria, aproximadamente, 50% do total de suas emissões, tendo em vista que estaria evitando que

fossem emitidos C_2H_4 para a atmosfera, provenientes da produção de energia a partir de combustíveis fósseis.

A análise dos resultados obtidos revela que é necessário que haja uma otimização na coleta de papel e papelão e sua reciclagem para que os benefícios ambientais oriundos da reciclagem possam ser introduzidos com mais intensidade no balanço de emissões. Os benefícios ambientais associados ao reúso, ao aproveitamento de resíduos e à reciclagem já vêm sendo demonstrados por estudos baseados em ACV: Carvalho *et al.* (2019) quantificaram as emissões obtidas com o uso do bagaço da cana-de-açúcar para geração de eletricidade e comparou com o *mix* elétrico, demonstrando os benefícios. Araújo *et al.* (2018) analisaram quatro cenários finais para resíduos de poda urbana e quantificaram as emissões de GEE associados a cada cenário, comprovando a importância da ACV para auxiliar as tomadas de decisão. O cenário com mais benefícios ambientais foi a geração de

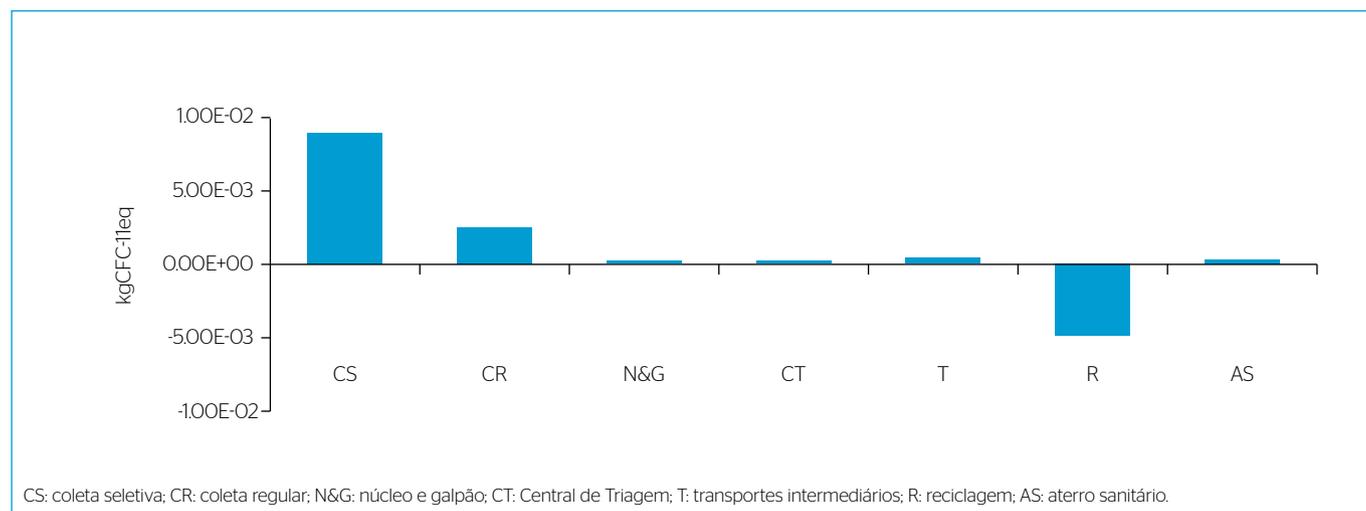


Figura 9 - Influência na destruição da camada de ozônio nas diferentes etapas do sistema de coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa em 2014 (indicador de categoria de impacto/unidade funcional).

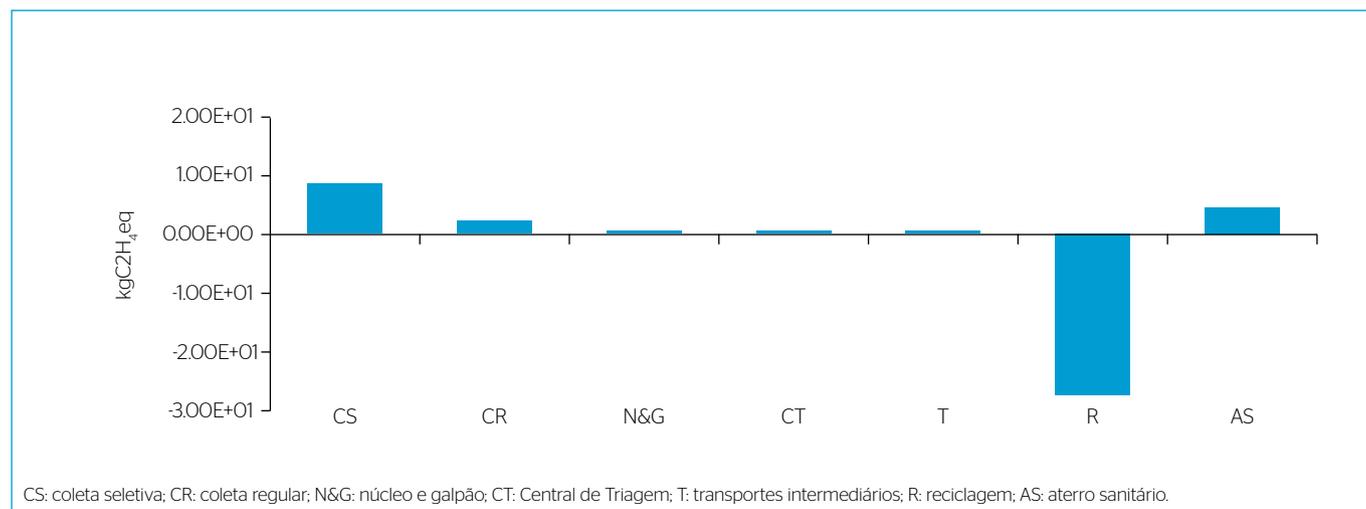


Figura 10 - Influência na oxidação fotoquímica nas diferentes etapas do sistema de coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa em 2014 (indicador de categoria de impacto/unidade funcional).

bioeletricidade com os resíduos da poda. Neves *et al.* (2017) desenvolveram uma ACV para quantificar os impactos ambientais associados à utilização de biosólido industrial (resíduo) para a fertilização e obteve valores muito mais baixos em comparação com a fertilização química comercial. Por fim, Carvalho *et al.* (2016) desenvolveram uma ACV para verificar se o biodiesel produzido a partir de óleo de soja refinado possui melhor desempenho ambiental que o diesel; verificou-se que a produção da soja impactou negativamente no resultado.

Para finalizar, destaca-se o papel importante da ACV na avaliação de critérios ambientais, permitindo identificar etapas do ciclo de vida mais poluentes e aquelas que possuem maiores margens para melhoria. A aplicação da ACV pode auxiliar no gerenciamento de resíduos sólidos, proporcionando informação importante aos tomadores de decisão e guiando para as melhores soluções desde uma perspectiva ambiental.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou impactos ambientais específicos provenientes do ciclo de vida do Programa de Coleta Seletiva no Núcleo do Bessa (município de João Pessoa), contribuindo para identificar as etapas que possuam margens para melhoria desde um ponto de vista gerencial.

Após a coleta de dados sobre os fluxos de matéria e energia associados a cada etapa do processo de coleta seletiva, desenvolveu-se uma ACV para calcular as cargas ambientais específicas relativas à acidificação, à eutrofização, ao aquecimento global, à destruição da camada de ozônio e à oxidação fotoquímica.

Verificou-se que a reciclagem traz benefícios ambientais e, no caso de eutrofização, aquecimento global e oxidação fotoquímica, as emissões evitadas são de magnitude bastante superior à soma das outras etapas consideradas (coleta seletiva, coleta regular, consumos de energia nos galpões, CT, transportes e aterro sanitário). Quando há reciclagem, o balanço de emissões é negativo para estas categorias: eutrofização, aquecimento global e oxidação fotoquímica. Entretanto, ao se considerar a destruição da camada de ozônio e acidificação, as emissões negativas associadas à reciclagem não foram suficientes para a obtenção de um balanço global negativo.

A busca por soluções para a gestão adequada dos resíduos sólidos é um desafio constante, nos setores públicos e privados. Portanto, a utilização da ACV é uma importante ferramenta para auxiliar em uma gestão eficiente dos resíduos sólidos e, conseqüentemente, eliminar ou diminuir os impactos ambientais danosos causados por esses resíduos.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, J.C. (2013) *Diagnóstico e Inventário de Ciclo de Vida do Sistema de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Imperatriz - MA*. 94f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Ambiental) - Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul.

ARAÚJO, Y.R.V.; GÓIS, M.L.; JÚNIOR, L.M.C.; CARVALHO, M. (2018) Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, n. 2, p. 1863-1868. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0613-y>

ARENA, U.; MASTELLONE, M.L.; PERUGINI, F.; CLIFT, R. (2004) Environmental Assessment of Paper Waste Management Options by Means of LCA Methodology. *American Chemical Society*, n. 43, n. 18, p. 5702-5714. <https://doi.org/10.1021/ie049967s>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). (2013) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013*. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2013/>>. Acesso em: 1º fev. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). (2014) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014*. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4389267/mod_resource/content/1/panorama2014.pdf>. Acesso em: 1º fev. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). (2016) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016*. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2016/>>. Acesso em: 1º fev. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2014a) *NBR 14040: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida, princípios e estruturas*. Rio de Janeiro: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2014b) *NBR 14044: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida, requisitos e orientações*. Rio de Janeiro: ABNT.

BOVEA, M.D.; IBÁÑEZ-FORÉS, V.; GALLARDO, A.; COLOMER-MENDOZA, F.J. (2010) Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. *Waste Management*, v. 30, n. 11, p. 2383-2395. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.001>

BRASIL. (2016) Ministério das Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional (ano 2015)*. Brasília: Ministério das Minas e Energia.

CARVALHO, M.; SEGUNDO, V.B.D.S.; MEDEIROS, M.G.; SANTOS, N.A.; COELHO JUNIOR, L.M. (2019) Carbon footprint of the generation of bioelectricity from sugarcane bagasse in a sugar and ethanol industry. *International Journal of Global Warming*, v. 17, n. 3, p. 235-251. <https://dx.doi.org/10.1504/IJGW.2019.098495>

- CARVALHO, M.; SILVA, E.S.; ANDERSEN, S.L.; ABRAHÃO, R. (2016) Life cycle assessment of the transesterification double step process for biodiesel production from refined soybean oil in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, n. 11, p. 11025-11033. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6295-z>
- DEUS, R.M.; BATTISTELLE, R.A.G.; SILVA, G.H.R. (2017) Scenario evaluation for the management of household solid waste in small Brazilian municipalities. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 19, n. 1, p. 205-214. <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-016-1205-0>
- ECOINVENT CENTRE. (2014) *Ecoinvent database version 3.1*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Suíça: Ecolnvent Centre.
- EMPRESA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA (EMLUR). (2014) *Informações disponibilizadas pela Autarquia Especial Municipal de Limpeza Urbana ao Projeto de Pesquisa Universal nº 484357/2013-1*. Ceditas Através de Carta de Anuência. João Pessoa: EMLUR.
- EMPRESA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA (EMLUR). (2015) *Informações disponibilizadas pela Autarquia Especial Municipal de Limpeza Urbana ao Projeto de Pesquisa Universal nº 484357/2013-1*. Ceditas Através de Carta de Anuência. João Pessoa: EMLUR.
- FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M.Z.; EKVALL, T.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HELLWEG, S.; KOEHLER, A.; PENNINGTON, D.; SUH, S. (2009) Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 1, pages 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- GARCIA, H.R. de M. (2016) *Avaliação do Ciclo de Vida socioambiental do programa de coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares do município de João Pessoa/PB, Brasil. Estudo de caso: Núcleo do Bessa*. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- GEMECHU, E.D.; BUTNAR, I.; GOMÀ-CAMPS, J.; PONS, A.; CASTELLS, F. (2013) A comparison of the GHG emissions caused by manufacturing tissue paper from virgin pulp or recycled waste paper. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, n. 8, p. 1618-1628. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0597-x>
- GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. de; OERS, L.; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO de HAES, H.A.; BRUIJN, H. de; DUIN, R.; HUIJBREGTS, M.A.J. (2002) Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 692 p.
- HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. (2012) *What a Waste: a global review of solid waste management*. Urban Development e Local Government Unit; World Bank. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/3363871334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf>. Acesso em: 23 out. 2014.
- IBÁÑEZ-FORÉS, V. (2009) *Optimización del Sistema de Gestión de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de Castellón de la Plana Mediante la Aplicación de Técnicas de Análisis del Ciclo de Vida (ACV)*. 231f. Trabalho de Conclusão de Curso (Grado em Engenharia Industrial) - Universitat Jaume I, Castellón.
- IBÁÑEZ-FORÉS, V.; BOVEA, M.D.; NÓBREGA, C.C.; GARCÍA, H.R. de M.; LINS, R.B. (2018) Temporal evolution of the environmental performance of implementing selective collection in municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study. *Waste Management*, v. 72, p. 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.027>
- INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL SCIENCES (CML). (2016) *Database CML-IA Characterisation Factors*. CML. Disponível em: <<https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>>. Acesso em: 15 mar. 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2017) *Cidades - João Pessoa/Bessa*. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/joao-pessoa/panorama>>. Acesso em: 25 set. 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2010) Sistema IBGE de Recuperação Automática. *Universo - Característica da População e dos Domicílios 2010*. João Pessoa/Bessa. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp?c=1378&z=cd&o=7&i=P>>. Acesso em: 25 nov. 2014.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA); BRASIL. (2010) *Pesquisa sobre Pagamento por Serviços Ambientais Urbanos para Gestão de Resíduos Sólidos*. Brasília: IPEA. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/253/_arquivos/estudo_do_ipea_253.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2018.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). (2006a) *ISO 14040*. Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework. ISO.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). (2006b) *ISO 14044*. Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines. ISO.
- KARAK, T.; BHAGAT, R.M.; BHATTACHARYYA, P. (2012) Municipal Solid Waste Generation, Composition, and Management: The World Scenario. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 42, n. 15, p. 1509-1630.
- LAURENT, A.; BAKAS, I.; CLAVREUL, J.; BERNSTAD, A.; NIERO, M.; GENTIL, E.; HAUSCHILD, M.Z.; CHRISTENSEN, T.H. (2014) Review of LCA studies of solid waste management systems - Part I: lessons learned and perspectives. *Waste Management*, v. 34, n. 3, p. 573-588. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1300559X>>. Acesso em: 24 nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>
- LUZ, F.C.; ROCHA, M.H.; LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J.; ANDRADE, R.V.; LEME, M.M.V.; OLMO, O.A. (2015) Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. *Energy Conversion and Management*, v. 103, p. 321-337. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.074>
- MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA. (2014) *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de João Pessoa*. Diagnóstico. João Pessoa: Prefeitura de João Pessoa. Disponível em: <<http://issuu.com/pmjponline/docs/diagnostico>>. Acesso em: 21 nov. 2014.

NEVES, T.I.; UYEDA, C.A.; CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R. (2017) Environmental evaluation of the life cycle of elephant grass fertilization – *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone – using chemical fertilization and biosolids. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 190, n. 1, p. 30. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6406-4>

PRÉ CONSULTANTS. (2013) *SimaPro* v.8. Pre Consultants, B.V. Holanda: Amersfoort Disponível em: <<https://www.pre-sustainability.com/simapro-installation>>. Acesso em: 21 mar. 2015.

SEVIGNÉ-ITOIZ, E.; GASOL, C.M.; RIERADEVALL, J.; GABARRELL, X. (2015) Methodology of supporting decision-making of waste management with material flow analysis (MFA) and consequential life cycle assessment (CLCA): case study of waste paper recycling. *Journal of Cleaner Production*, n. 105, p. 253-262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.026>

WEIDEMA, B.P. (2003) Market Information in Life Cycle Assessment. *Environmental Project no. 863*. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency.

WEIDEMA, M.P.; EKVAL, T.; HEIJUNGS, R. (2009) *Guidelines for applications of deepened and broadened LCA: consequential LCA*. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.628.948&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

WORLD ENERGY COUNCIL. (2016) *World Energy Resources Waste to Energy*. World Energy Council. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

YAY, A.S.E. (2015) Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. *Journal of Cleaner Production*, v. 94, p. 284-293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.089>