

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO PROGRAMA DE COLETA SELETIVA DO PLÁSTICO NO MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA/PB – BRASIL

* Raíssa Barreto Lins¹
Claudia Coutinho Nóbrega¹
Hozana Raquel Medeiros de Garcia²
Valeria Ibáñez-Forés³
Elizabeth Sousa de Araújo¹

ANALYSIS OF THE LIFE CYCLE OF THE SELECTIVE PLASTIC COLLECTION PROGRAM IN THE MUNICIPALITY OF JOÃO PESSOA / PB – BRAZIL

Recibido el 29 de marzo de 2019; Aceptado el 4 de mayo de 2020

Abstract

Nowadays with the unstoppable production of solid residues, the selective waste collection appears as a possible destination for this sum produced. The plastic is a recyclable material and used in many different ways, therefore, its reintroduction in the productive process reveals its importance in the economic and environmental fields. The general goal of this present study is to evaluate the environmental impact of the life cycle of the selective collection system of plastic in the screening centers of the city of João Pessoa, Paraíba – Brazil, in the period between 2005 to 2015. The environmental analysis of the selective waste collection made use of the tool Life Cycle Analysis (LCA) which processed input data regarding the quantitative aspect of plastic collected, water consumption, energy and diesel with the aid of SimaPro 8.01 software. The obtained results reveal that the eutrophication and the reduction of the ozone layer are not compensated by the net benefits from the selective waste collection, even if not significant, being the regular selective waste collection the main impacting stage identified. The acidification, the global warming and the photochemical oxidation resulted in categories that compensate for the net benefits of selective waste collection, where recycling is the main compensatory step. Thus, the recycling should be made with a larger amount of plastic, in order to allocate properly the waste of this type and reduce the environmental impacts from the selective waste collection system as a whole.

Keywords: environmental impact, selective collection, solid waste management, *Life Cycle Analysis (LCA)*.

¹ Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Brasil

² Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

³ Universitat de Jaumé I, Brasil.

* *Autor correspondente:* Raissa Barreto Lins: Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. Rua Catulo da Paixão Cearense, 607, apartamento 1801 – Brisamar, João Pessoa, Paraíba. Código Postal: 58033060. Brasil. Email: raissablins@gmail.com

Resumo

Devido à geração desenfreada de resíduos sólidos na atualidade, a coleta seletiva surge como uma possível solução para o montante de resíduo reciclável gerado. O plástico é um material passível de reciclagem amplamente utilizado para variados fins e, por isso, sua reintrodução no processo produtivo revela-se como de grande importância econômica e ambiental. O objetivo deste estudo foi avaliar o ciclo de vida do sistema de coleta seletiva do plástico nos núcleos de coleta seletiva e central de triagem do município de João Pessoa, Paraíba – Brasil, no período compreendido entre os anos de 2005 e 2015. 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 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A ACV considerou todas as fases do sistema de gestão dos RSD: coleta regular, coleta seletiva, reciclagem, disposição final e transportes intermediários. Utilizou-se o software SimaPro, com a base de dados Ecoinvent, e método de avaliação de impacto ambiental CML-IA baseline versão 3.00/World 2000. Os resultados obtidos revelam que a eutrofização e a redução da camada de ozônio não são compensadas pelos benefícios líquidos oriundos da coleta seletiva, mesmo que de maneira pouco significativa, sendo a coleta regular a principal etapa impactante identificada. A acidificação, o aquecimento global e a oxidação fotoquímica resultaram em categorias que compensam em benefícios líquidos advindos da coleta seletiva, onde a reciclagem é a principal etapa compensatória. Assim, a reciclagem deve ser realizada com um maior montante de plásticos, afim de destinar corretamente os resíduos deste tipo e, conseqüentemente, reduzir os impactos ambientais oriundos do sistema de coleta seletiva como um todo.

Palavras chave: coleta seletiva, gestão de resíduos sólidos, impacto ambiental, Análise do Ciclo de Vida (ACV).

Introdução

Devido ao estilo de vida adotado pela sociedade consumista da atualidade, o montante de resíduos sólidos gerados é cada vez maior. Neste cenário, a busca pelo equilíbrio entre a elevada produção de resíduos sólidos e a sustentabilidade é complexa.

A situação é significativamente mais complicada quando se consideram os centros urbanos. Nestes locais onde a densidade demográfica é maior, a produção de resíduos ultrapassa os limites de acomodação disponíveis na atualidade, fazendo com que se busquem medidas cada vez mais onerosas (Silva *et al.*, 2014). Em meio a toda essa problemática, tem-se uma grande parcela da população que considera os resíduos sólidos como algo indesejado e sem valor e, por isso, destina-os ao acaso, gerando prejuízos sociais, econômicos, ambientais e sanitários. Para Laurent *et al.* (2014) é evidente a íntima relação entre o consumismo e a geração de resíduos e, por isso, o aumento do primeiro exige que a população geradora destes materiais busque soluções práticas e coerentes, mudanças de hábitos e modelos de gestão que se assemelhem a uma sociedade ambientalmente sustentável, capaz de reverter este quadro.

Segundo o panorama dos resíduos sólidos elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais- ABRELPE (2017), no ano de 2017, o Brasil gerou 78.4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, sendo a maioria (91.2%) destinada a coleta, porém, destes apenas 59.1% tiveram disposição final correta. Deste modo, tem-se que a

quantidade de resíduos com disposição incorreta (ou seja, enviados para lixões) foi de 29 milhões de toneladas/ano, sendo boa parte desta composta por resíduos recicláveis e matéria orgânica.

O programa de coleta seletiva é um sistema que objetiva a destinação correta dos resíduos sólidos e, para isso, envolve vários atores de maneira direta ou indireta. Dentre os participantes inseridos diretamente estão os catadores de resíduos domiciliares, a Prefeitura do Município (através de sua empresa de limpeza urbana), os sucateiros e a indústria recicladora, e, indiretamente, os envolvidos são o meio ambiente e a sociedade, sendo o primeiro afetado por vários aspectos, entre os quais os insumos empregados na fabricação de produtos recicláveis (energia, água e matéria prima) e os impactos provocados pela disposição dos resíduos em aterros ou lixões (Nóbrega, 2003).

Embora a coleta seletiva de materiais recicláveis revele-se como uma maneira eficaz de reincorporar esses resíduos no setor produtivo, a adesão popular a este sistema ainda é pequena e amplamente questionada diante de sua viabilidade econômica e, sobre sua contribuição social e se a minimização dos impactos ambientais sobrepõe seus custos.

Segundo Garcia *et al.* (2015), no município de João Pessoa, em 2013, estimou-se que menos de 2% do total de resíduos produzidos pela população foram encaminhados para o programa de coleta seletiva formal, números que ratificam o reduzido montante de resíduos atendido por esta atividade. Segundo Bovea *et al.* (2018), nos bairros contemplados pelo Programa de Coleta Seletiva de João Pessoa, são atendidos 80722 domicílios com este serviço.

No contexto das rotas percorridas pelo serviço de coleta de resíduos, torna-se necessário um planejamento detalhado das mesmas, pois trata-se de um processo contínuo e que pode acarretar em prejuízos consideráveis para a população e para o meio ambiente. Assim, é relevante enfatizar que em muitas localidades, os resíduos passam por mais de um tipo de transporte, devendo cada um destes ser considerado quanto à distância percorrida e quantidade de resíduo transportado, por exemplo, assim como os impactos por ele previstos (Gregor *et al.*, 2017). No contexto da distância percorrida pela coleta de recicláveis, Hou *et al.* (2018) averiguaram que é maior do que para a mescla de resíduos destinada ao Aterro Sanitário, devido à quantidade de recicláveis recolhida ser menor para uma determinada rota. Entretanto, o trabalho ressalta que embora existam barreiras técnicas para a reciclagem destes materiais, é vantajoso ambientalmente reciclar o resíduo em questão ao invés de enviá-lo para aterro ou incineração para corrigir este cenário. Os autores indicam a necessidade de investir em equipamentos, a conscientização e cooperação de várias partes interessadas, a mudança no designer de embalagens para que contenham em seus rótulos informações referentes a reciclagem do produto em questão, a existência de iniciativas educativas junto a comunidades e o incentivo a participação da mesma Hou *et al.* (2018).

Em agosto de 2010 foi instituída a Lei Nº 12.305, denominada de Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Essa representou um marco importante para a tomada de decisões em relação à disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, que acarretaria uma significativa melhora no âmbito da Gestão de Resíduos e maior incentivo para a realização da coleta seletiva (Silva, 2014). É importante destacar que a partir da lei supracitada, uma parte dos municípios brasileiros tomou medidas como a desativação de lixões, sua posterior substituição por aterros sanitários e, passou a apoiar cooperativas e/ou associações de catadores. Entretanto, embora a legislação tenha gerado uma série de avanços na adoção de novas práticas na dinâmica da gestão de resíduos, assim como da coleta seletiva, ainda possui resultados inferiores ao desejado.

Para Oliveira *et al.* (2012), dentre os resíduos produzidos no Brasil, o plástico resalta-se como de significativa representatividade. Segundo os autores, são consumidos em média 19 quilos de sacolas plásticas por ano evidenciando o uso desenfreado deste material. Embora o consumo destes plásticos seja crescente, estudos realizados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2013) revelam que a reciclagem do plástico tem aumentado nos últimos anos, assim como a do alumínio e do papel. Isto ocorre devido ao fato de grande parte deste material, ser potencialmente reciclável e, poder ser reinserido na prestação de serviços através desta prática, contribuindo para a economia de recursos naturais não renováveis (petróleo) e reduzindo o seu quantitativo disposto indevidamente. Contudo, a parcela reciclável deste material é composta majoritariamente pelos plásticos rígidos, já que aqueles em formato de filme se encontram muito sujos e contaminados, exigindo uma etapa de limpeza mais complexa que na maioria das vezes não é viável.

No município de João Pessoa a quantidade de matéria orgânica e resíduos verdes (originário da poda ou remoção de árvores e plantas) correspondem a 51%, enquanto que a fração correspondente ao plástico é de 14% em massa. (Município de João Pessoa, 2014). Segundo a EMLUR (2016), no período compreendido entre 2005 e 2015, os núcleos da capital paraibana receberam 29993,18 toneladas de resíduos sólidos passíveis de reciclagem, sendo 10668,26 toneladas correspondentes a plásticos, ou seja, aproximadamente 36% dos materiais recicláveis atendidos pela coleta seletiva de João Pessoa nos anos considerados são correspondentes a plásticos, ratificando a grande relevância no estudo do plástico como o material de frequente identificação na gestão dos resíduos sólidos urbanos – RSU. Quanto a sua tipologia, de acordo com a EMLUR (2016), os plásticos atendidos pela coleta seletiva de João Pessoa são majoritariamente PET, plástico grosso, plástico fino e plástico misto.

Considerando-se que o plástico é um material reciclável amplamente gerado pela população do município de João Pessoa, o presente estudo tem como objetivo analisar o impacto ambiental do ciclo de vida do sistema de coleta seletiva do referido material nos núcleos de coleta seletiva e na central de triagem do município de João Pessoa, Paraíba - Brasil.

Metodologia

Caracterização da Área Estudada

O município de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba (PB) é limitado pelos municípios de Cabedelo (norte), Conde (sul), Santa Rita (oeste) e pelo Oceano Atlântico (leste), que juntamente com outros oito municípios formam a Região Metropolitana de João Pessoa (Figura 1). O referido município possui uma população estimada de 800323 habitantes e área territorial de 211.475 km² (IBGE, 2018). Sua economia está atrelada ao comércio, indústria e turismo que geram para o município um Produto Interno Bruto (PIB) de R\$ 10107596,00 (Município de João Pessoa, 2014).

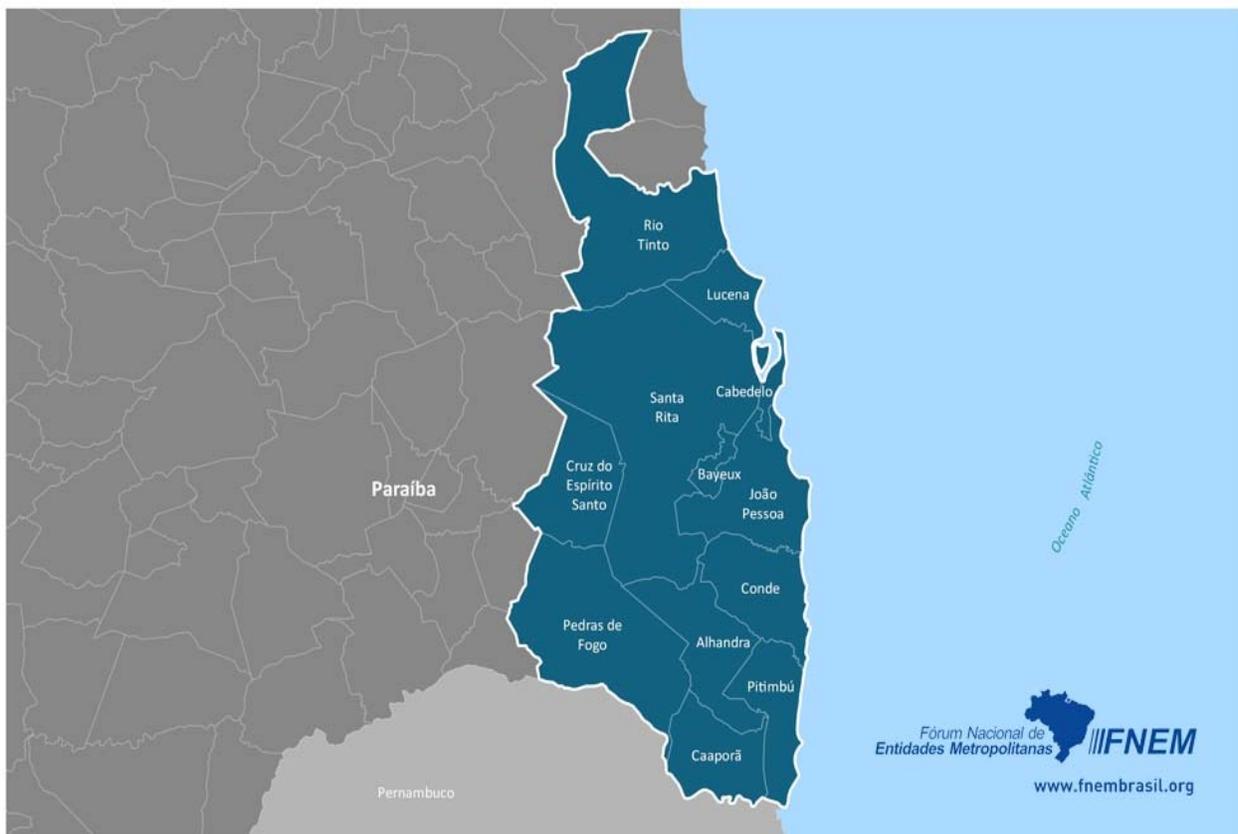


Figura 1. Localização da Região Metropolitana do município de João Pessoa (Emplasa / CDT, 2018).

As unidades empíricas de referência consideradas para elaboração deste trabalho foram os núcleos de coleta seletiva do município de João Pessoa: Cabo Branco, Bessa, Caic, Estados, Mangabeira e Central de Triagem. Os núcleos atendem 24 bairros, correspondendo a cerca de 30% da população (Município de João Pessoa, 2014) ou 80722 residências (IBGE, 2010).

Caracterização do Sistema de Gestão de Resíduos do Município de João Pessoa

O sistema de coleta seletiva do município inicia-se com a segregação do material passível de reciclagem pelos moradores em suas residências, geralmente em seco e úmido. Os resíduos a serem reciclados são dispostos aos catadores, que então os encaminham para um galpão de um núcleo de coleta seletiva, onde ocorrerá a separação em papel, papelão, metal, vidro e borracha. Em seguida, esses materiais são encaminhados para a comercialização. Esta etapa é realizada por agentes intermediários (atravessadores/sucateiros) do processo, que compram dos catadores e revendem para a indústria recicladora, que após sua aquisição transforma os mesmos em outros produtos. Estes agentes intermediários surgiram devido à dificuldade dos catadores de se organizarem para vender diretamente à indústria, além da falta de infraestrutura necessária (e.g., central de recebimento de materiais para comercialização e transporte adequado) (Garcia, 2016).

Avaliação de Ciclo de Vida - ACV

A motivação para a realização do estudo parte da PNRS (2010), que caracteriza a Análise do Ciclo de Vida (ACV) como uma ferramenta fundamental na gestão dos resíduos sólidos no Brasil, já que essa é capaz de identificar os impactos ambientais gerados em cada etapa da coleta seletiva e, assim, contribuir para otimização do sistema como um todo.

A ACV está normatizada internacionalmente pela *International Organization for Standardization* (ISO) em suas normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006), que no Brasil foram traduzidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) nas NBR 14040 (2014a) e 14044 (2014b). A ACV possui quatro etapas inter-relacionadas: 1) Definição do objetivo e escopo; 2) Inventário do Ciclo de Vida – ICV; 3) Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida; e 4) Interpretação do Ciclo de Vida. Portanto, o objetivo da aplicação desta metodologia é avaliar o impacto ambiental associado ao ciclo de vida do programa de coleta seletiva do plástico realizado município de João Pessoa/PB, Brasil.

Definição do objetivo e escopo

A fronteira foi delimitada contemplando as seguintes etapas: coleta e transporte do material (plástico) das residências até os núcleos e dos domicílios até Central de Triagem (CT); separação dos resíduos no galpão dos núcleos 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.

A unidade funcional (UF) deste estudo, à qual estão relacionadas todas as entradas e saídas de matéria e energia, foi uma tonelada de resíduos sólidos domiciliares por habitante-ano na unidade de triagem, conforme sugerido por Ibáñez-Forés (2009) e Chi *et al.* (2014). A Figura 2 mostra o escopo do estudo, aplicado à coleta seletiva de plástico, no município, em estudo.

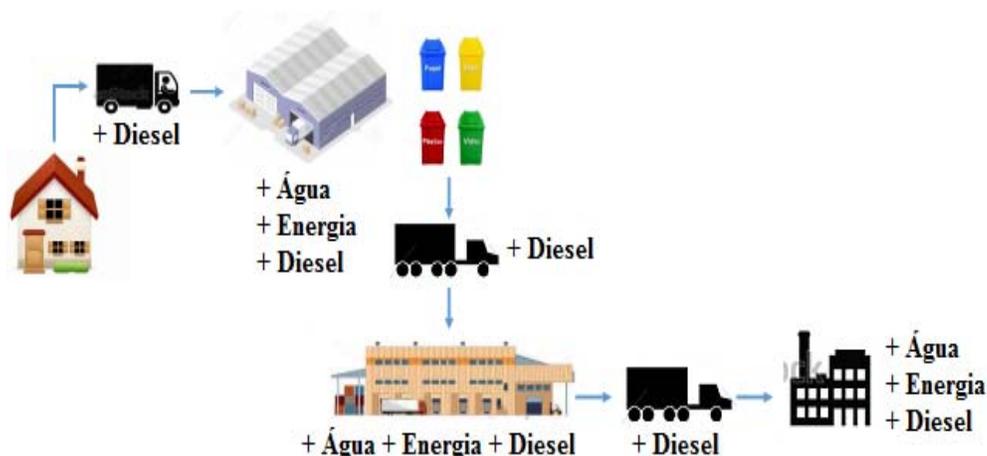


Figura 2. Escopo do estudo aplicado à coleta seletiva no município de João Pessoa (adaptado de Garcia, 2016).

Inventário do Ciclo de Vida

Esta etapa consiste na coleta dos dados e procedimentos de cálculos para quantificar as entradas (energia, matéria-prima, recurso hídrico) e saídas (emissões atmosféricas, descargas para o solo e água) do sistema. O software SimaPro versão 8.01 (Pré Consultants, 2015) foi utilizado para o desenvolvimento da ACV, selecionando-se a base de dados Ecoinvent 3.2 (Ecoinvent, 2014) para representar os processos de matéria e energia associados à UF. 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, escolheu-se os processos com a denominação *Allocation Default* (alocação padrão), que segue a abordagem atribucional onde as cargas são atribuídas proporcionalmente aos processos específicos (ECOINVENT, 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 e Ekvall, 2009), com objetivo final de aperfeiçoar os sistemas estudados (Weidema, 2003).

Para elaborar o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) da coleta seletiva do plástico foi necessário:

- I. Identificar a quantidade de resíduos gerados e sua distribuição dentro dos três possíveis destinos: coleta seletiva, central de triagem e aterro sanitário.
- II. Quantificar a geração de plásticos entre os Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD) coletados e destinados aos núcleos e a central de triagem.
- III. 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.

- IV. Identificar a composição final da reciclagem correspondente aos Núcleos de Coleta Seletiva e à CT.
- V. 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 transporte até os tanques regionais de estoque.
- VI. Quantificar os consumos de água, eletricidade e diesel, correspondentes aos núcleos estudados e à CT, galpão do atravessador e indústria recicladora. Estes dados foram disponibilizados pela EMLUR (2015). O processo selecionado para o consumo de diesel foi o mesmo do item anterior. Para o consumo de eletricidade, adaptou-se o processo *Electricity, low voltage, at grid, BR* considerando a composição: hidrelétrica 67.4%, gás natural 13%, 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. A Tabela 1 resume o item de ICV.

Tabela 1. Etapas analisadas para o inventário de ciclo de vida (adaptado de Garcia, 2016).

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 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 CT até o atravessador, e do atravessador à indústria recicladora
Reciclagem (R)	Consumos de água, eletricidade e diesel associados às atividades de reciclagem

Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Após construção do ICV, procede-se à escolha de um método de avaliação de ciclo de vida. A avaliação de impacto analisa os efeitos humanos e ecológicos da utilização de energia, água, materiais e descargas ambientais identificadas na análise do inventário. Aqui se utilizou o método CML-IA baseline versão 3.00/World 2000 (Guinée *et al.*, 2002; Institute of Environmental Sciences - 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).

Dentre as categorias de impacto disponibilizadas pelo método CML-IA baseline versão 3.00/World 2000 (Guinée *et al.*, 2002; CML, 2016), selecionou-se acidificação, eutrofização, aquecimento global, destruição da camada de ozônio e oxidação fotoquímica. Estas categorias de impactos foram selecionadas para facilitar a comparação com a literatura científica existente (Bovea *et al.*, 2010; Quirós *et al.*, 2014; Kulczycka *et al.*, 2015; Lou *et al.*, 2015; Tang *et al.*, 2013).

As substâncias acidificantes causam uma ampla gama de impactos no solo, aquíferos, organismos, ecossistemas e 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. A eutrofização é caracterizada pelo aumento desmesurado de nutrientes, principalmente em meios aquáticos, suscitando o crescimento populacional de alguns organismos, e.g. algas. Além disso, a eutrofização causa diminuição da concentração de oxigênio nos meios receptores e impactos associados a excessiva quantidade de macro-nutrientes no ambiente, causado por emissões de nutrientes ao ar, água e solo. O potencial de eutrofização está baseado no procedimento estequiométrico de Heijungs (1992), sendo sua escala geográfica variável entre local e continental.

O aquecimento global pode resultar em efeitos adversos sobre a saúde dos ecossistemas e dos humanos, e está relacionado às emissões de gases de 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 deste 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 à saúde humana e animal, aos ecossistemas aquáticos e terrestres, aos ciclos bioquímicos e nos materiais. Esta categoria possui escala global.

O modelo de caracterização foi desenvolvido pelo *World Meteorological Organization* (WMO) e define o potencial de depleção da camada de ozônio para diferentes gases, expressando em kg CFC-11-eq. O escopo geográfico é global.

A oxidação fotoquímica corresponde a formação de substâncias reativas (principalmente ozônio), que são danosas à saúde humana e dos ecossistemas. 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 ACV.

Por fim, a interpretação avalia os resultados da análise do inventário. A partir dos resultados dessa etapa podem ser encontradas as conclusões e recomendações às tomadas de decisão.

Resultados e discussões

Para a elaboração do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) da gestão de resíduos sólidos domiciliares e da coleta seletiva dos núcleos do município de João Pessoa, torna-se necessário a coleta de dados de entrada e saída requeridos pelo sistema. No presente trabalho, considerou-se como entradas os dados quantitativos da coleta seletiva do plástico e dos demais recicláveis entre os anos de 2005 e 2015 (anteriormente citado) e dados referentes ao consumo de energia (kwh/T), água (kg/T) e diesel (L/T) nos núcleos, central de triagem, aterro sanitário, atravessador e indústria recicladora. Como saídas, considerou-se as categorias de eutrofização, acidificação, aquecimento global, destruição da camada de ozônio e oxidação fotoquímica.

Quanto aos dados de entrada, os valores referentes ao consumo de água e energia nos núcleos de triagem foram obtidos junto a EMLUR (2015), através da apresentação de contas dos referidos locais. Os dados de diesel foram calculados por trecho tomando como base o Roteiro de Coleta de Resíduos Sólidos citado anteriormente.

Para o galpão do atravessador, considerou-se os consumos de água, eletricidade e diesel sendo zero (0), já que os materiais são vendidos pelos catadores devidamente preparados para serem revendidos a indústria recicladora, tornando desnecessário o uso de prensa e de outros equipamentos.

Segundo Garcia (2016), a reciclagem do plástico requer o consumo de 400 kg/T de água e de 4.190 kwh/T de eletricidade, não sendo necessário o consumo de diesel. A indústria recicladora do material em questão utilizada para o presente estudo localiza-se na capital paraibana, ou seja, no município de João Pessoa.

A unidade funcional do presente estudo foi definida como 1 tonelada de resíduos sólidos domésticos gerados. Com os dados mostrados na Tabela 2 e posterior aplicação no software selecionado, torna-se possível a avaliação dos impactos ambientais oriundos da coleta seletiva do plástico no município de João Pessoa. As categorias de impacto investigadas foram a eutrofização (Kg PO_4 eq), acidificação (Kg SO_2 eq), oxidação fotoquímica (Kg C_2 eq), redução na camada de ozônio (Kg CFC_{-11} eq) e aquecimento global (Kg CO_2 eq).

Tabela 2. Consumo de eletricidade, água e diesel.

Instalações	Diesel (L/T)	Água (kg/T)	Eletricidade (Kwh/T)
Coleta Seletiva	188.285	0	0
Núcleos	0	5856.714	50.116
Galpão Atravessadores	0	0	0
Central de Triagem	0	1072.984	45.878
Transporte	45.503	0	0
Reciclagem	0	400	4190
Aterro Sanitário	0.010	0	0.041

Eutrofização

Considerando que os valores negativos representam benefícios ambientais líquidos e são atribuídos a prevenção de emissões (Foolmaun, 2012), a Figura 3 mostra que as etapas de coleta regular e aterro sanitário são as mais impactantes. Sabendo-se que a Coleta Regular (CR) considerou o trajeto entre a Origem e a Central de Triagem (CT), o possível motivo para o resultado obtido para esta categoria deve ser proveniente do fato da rota percorrida ser grande em relação a quantidade de plástico transportado.

O impacto advindo do Aterro Sanitário deve-se ao fato da quantidade de plástico destinada a este local ser superior a parcela reciclada, inviabilizando esta etapa do processo para a categoria em questão. Além disso, o ASMJP não possui recuperação de gás. É relevante considerar que a produção de lixiviado pode favorecer a eutrofização, já que essa substância apresenta contaminantes que, caso não sejam tratados, podem provocar ou agravar esta categoria.

A Figura 3 mostra que o valor negativo obtido na etapa da reciclagem é benéfico ao meio ambiente líquido devido a prevenção de emissões, colaborando positivamente neste impacto. Porém, a reciclagem não compensa as principais emissões positivas provenientes da CS, CR e AS.

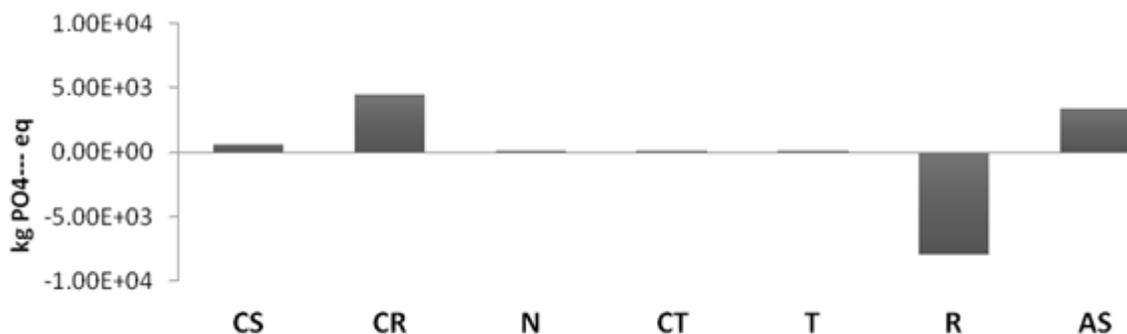


Figura 3. Contribuição líquida para a categoria de impacto eutrofização.

Acidificação

Na Figura 4 observa-se que as etapas mais impactantes, no período de 2005 a 2015, para a referida categoria são a Coleta Seletiva e a Coleta Regular. Considerando este quadro, tem-se que ambas as etapas possuem altas emissões de SO₂ advindo do transporte de resíduos realizado pelas mesmas. A CS, devido à proximidade entre a origem e os núcleos, possui valores menores de quilômetros percorridos e, conseqüentemente, de impactos advindos desta etapa. O percurso feito pelo caminhão compactador que transporta os resíduos desde sua origem até a Central de Triagem do município de João Pessoa (Coleta Regular) é longo, e, por isso, necessita de grandes quilômetros. Além disso, considera-se que a quantidade de plástico coletada é pequena quando comparada ao montante transportado, favorecendo assim a emissões maiores de gases, se comparado com a coleta seletiva.

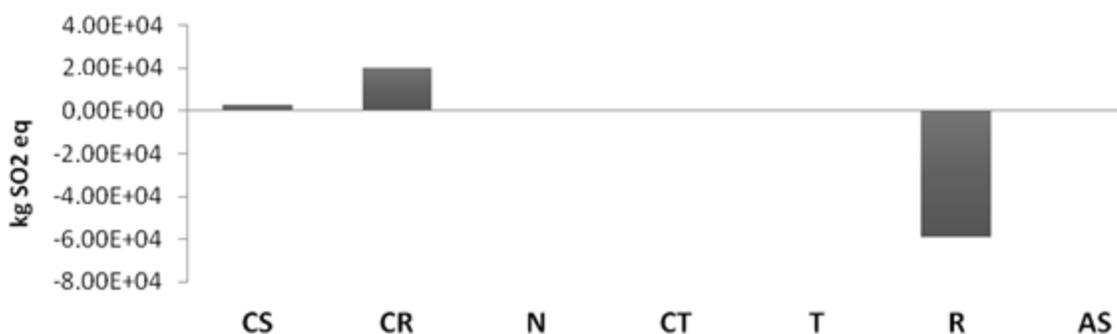


Figura 4. Contribuição líquida para a categoria de impacto acidificação

Mesmo com os dados supracitados, nota-se que na categoria de acidificação a reciclagem compensa as outras etapas como a CS e CR, ou seja, as emissões evitadas pela etapa da reciclagem são significativas.

Aquecimento Global

Verifica-se que a etapa de maior impacto é a CR, devido ao fato do montante de plástico ser pequeno quando comparado ao total de resíduos transportado desde sua origem até a CT (Figura 5). Mesmo existindo emissões de CO₂ nas demais etapas, a reciclagem compensa os impactos gerados para a categoria de Aquecimento Global.

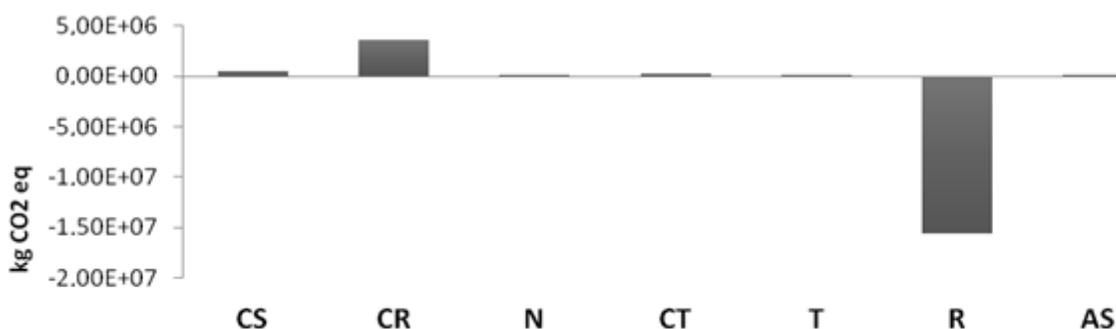


Figura 5. Contribuição Líquida para a categoria de impacto aquecimento global

Destruição da Camada de Ozônio

Diferente do que ocorre nas outras categorias, a depleção da camada de ozônio revela que a reciclagem não compensa as emissões de CFC-11. Observando a Figura 6, as maiores emissões são advindas da CS e, principalmente, da CR, fator que é justificado pelo transporte de quantidades pequenas de plásticos em relação aos grandes percursos percorridos.

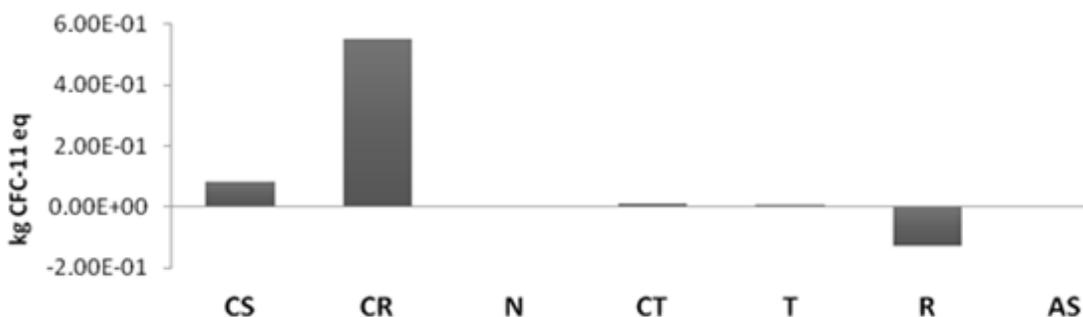


Figura 6. Contribuição Líquida para a categoria de impacto destruição da camada de ozônio

Além disso, as etapas do núcleo, central de triagem, transporte e aterro sanitário são colaboradoras em pequena escala, isto se deve ao consumo de combustível utilizado nestes setores. Assim, embora a reciclagem represente uma contribuição positiva a mesma é capaz de compensar apenas parte da emissão gerada pela CS e pela CR.

Oxidação Fotoquímica

Na Figura 7 é possível identificar os níveis de emissões de C_2H_4 , referentes a cada etapa da gestão de plástico no município de João Pessoa. Para a oxidação fotoquímica, a reciclagem apresentou-se favorável, havendo poucas alterações visuais no gráfico para as demais variáveis. Embora pesquisas indiquem que o aterro sanitário pode colaborar significativamente no impacto relacionado à oxidação fotoquímica, esta afirmação não foi comprovada neste estudo.

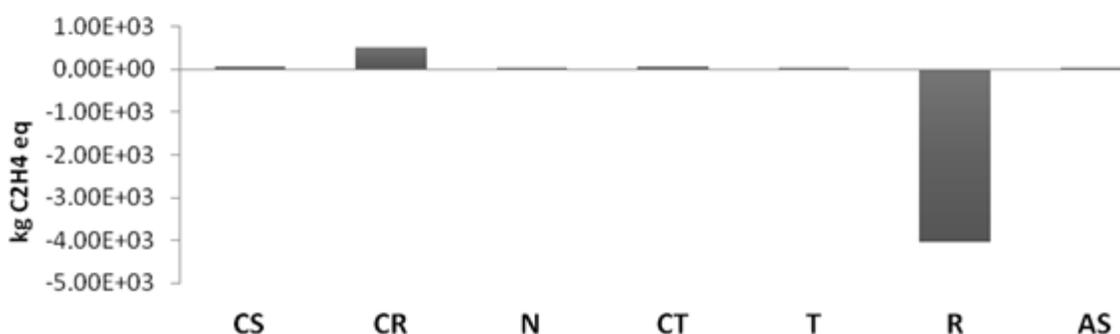


Figura 7. Contribuição Líquida para a categoria de impacto oxidação fotoquímica

Para este estudo, a reciclagem surge como principal compensação do impacto gerado por outras etapas, superando, inclusive, o somatório de todas as outras, com uma abordagem positiva de evitar a emissão do referido gás.

Conclusões

Através da série histórica de dez (10) anos de dados referentes a coleta seletiva no município de João Pessoa, tornou-se possível observar a evolução do cenário referente a esta temática no local de estudo. Embora haja mudanças ao longo do período considerado, é possível afirmar que a maioria dos núcleos tem obtido significativos avanços no total reciclado, como o núcleo do Bessa, por exemplo.

Dentre as cinco categorias de impactos selecionadas para a análise de ciclo de vida aplicada a coleta seletiva do plástico, concluiu-se que esta compensa os impactos ambientais referentes a acidificação, aquecimento global e oxidação fotoquímica. Analisando-se as etapas do percurso

realizado pelo plástico, foi verificado que a reciclagem é a principal responsável pela compensação, sendo esta a maior responsável pela geração de benefícios ambientais líquidos.

As categorias de depleção da camada de ozônio e eutrofização apresentaram resultado negativo para o período analisado neste estudo, ou seja, contribuem para o agravamento desses impactos, mesmo que em pequena proporção. Dentre as etapas do percurso realizado pelo plástico, verificou-se que a coleta regular é a principal responsável pela não compensação, isto ocorre devido ao fato do montante de plástico reciclado ser pequeno junto as distancias percorridas para seu reaproveitamento.

Assim, considerando o horizonte da pesquisa, conclui-se que a coleta seletiva do plástico, no município de João Pessoa, é responsável pela geração de benefícios significativos para o âmbito ambiental e por este motivo devem ser realizados esforços objetivando o aumento da parcela de resíduos recicláveis atendidos pelo serviço, já que isto resultaria na geração de maiores benefícios ambientais líquidos.

Referências bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006a) *NBR ISO 14040:2006a: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações*, 2ª ed, Rio de Janeiro, Brasil, 20 pp.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006b) *NBR ISO 14044:2006b: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações*, 1ª ed, Rio de Janeiro, Brasil, 46 pp.
- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2013). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, São Paulo, 114 pp.
- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2017). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, São Paulo, 74 pp.
- Brasil, Presidência da República Casa Civil (2010) Lei Federal nº 12.305 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, publicação Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília – DF, 03 de agosto de 2010. Acesso em 23 de janeiro de 2019, disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm
- 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*, **30**, 2383-2395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.001>
- Bovea, M. D., Ibáñez-Forés, V., Nóbrega, C. C., de Garcia, H. R. 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*, **72**, 65-77.
- Chi, Y., Dong, J., Tang, Y., Huang, Q., Ni, M. (2014) Life cycle assessment of municipal solid waste source-separated collection and integrated waste management systems in Hangzhou, China, *Journal of Mater Cycles Waste Management*, **17**(4), 695–706.
- CML-IA (2016) Institute of Environmental Sciences, Department of Industrial Ecology. Characterisation Factors. Acesso em 28 de fevereiro de 2019, disponível em: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>
- EMLUR, Autarquia Municipal Especial de Limpeza Urbana (2018). *Relatório de Atividades Anual*. João Pessoa, 1998 - 2002.

- EMLUR, Autarquia Municipal Especial de Limpeza Urbana (2018). *Relatório de Atividades Anual*. João Pessoa, 2000 - 2017.
- EMPLASA/CDT (2018) Região Metropolitana de João Pessoa. Acesso em 23 de fevereiro de 2019, disponível em: <http://fnembrasil.org/regiao-metropolitana-de-joao-pessoa-pb/>
- Foolmaun, R. K., Ramjeeawon, T. (2012). Comparative Life Cycle Assessment and Social Life Cycle Assessment of Used Polyethylene Terephthalate (PET) Bottles in Mauritius, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **18**(1), 155-171.
- Garcia, H. R. 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*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (Saneamento Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 135 pp.
- Garcia, H. R. M., Nóbrega, C. C., Bovea, M. D. E., Silva, C. M.; Lins, R. B. (2015) Avaliação do Ciclo de Vida Aplicada a Coleta Seletiva no Município de João Pessoa (PB) – Brasil, *28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Gregor, J., Šomplak, R., Paylas, M. (2017) Transportation Cost as an Integral Part of Supply Chain Optimization in the Field of Waste Management, *Chemical Engineering Transactions*, **56**, 1927-1932.
- Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A., Van Oers, L, Wegener A., Suh, S, Udo de Haes, H., Bruijn, J., Van Duin, R., Huijbregts, M. (2002) *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO Standards*, Netherlands, 692 pp. doi: 10.1007/0-306-48055-7.
- Heijungs, R., Guinée, J. B., Huppes, G., Lankreijer, R. M., de Haes, H. e Sleswijk, A., (1992). *Environmental Life Cycle Assessment of Products - Backgrounds and Guide LCA*. Leiden: CML - Centre of Environmental Science.
- Hou, P., Xu, Y., Taiebat, M., Lastokie, C., Miller, S. A., Xu, M. (2018) Life Cycle Assessment of End-of-life Treatments for Plastic Film Waste, *Journal of Cleaner Production*, **201**, 1052-1060.
- Ibañez-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)*, Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Industrial, Universitat Jaume I, Castellón de la Plana, 231 pp.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018). *Estimativa Censo Demográfico*.
- Kulczycka, J., Lelek, L., Lewandowska, A., Zarebska, J. (2015) Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management – Comparison of Results Using Different LCA Models, *Polish Journal of Environmental Studies*, **24**, 125-140. doi: <https://doi.org/10.15244/pjoes/26960>
- 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*, **34**(3), 573-588.
- Lou, Z., Bilitewski, B., Zhu, N., Chai, X., Li, B., Zhao, Y. (2015) Environmental impacts of a large-scale incinerator with mixed MSW of high water content from a LCA perspective, *Journal Environmental Sciences*, **30**, 173-179.
- Nóbrega, C.C. (2003) *Viabilidade Econômica, com Valoração Ambiental e Social, de Sistemas de Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Domiciliares – Estudo de Caso: João Pessoa/PB*, Tese de doutorado (Recursos Naturais), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 176 pp.
- Oliveira, L. L., Lacerda, C. S., Alves, I. J. B. R., Santos, E. D., Oliveira, S. A., Batista, T. S. A. (2012) Impactos Ambientais Causados pelas Sacolas Plásticas: o Caso Campina Grande - PB, *BioFar: Revista de Biologia e Farmácia*. **7**(1), 88-103.
- PMGIRS, Plano Municipal de Gestão integrada de Resíduos Sólidos de João Pessoa (2014). *Diagnóstico*, **1**, 467 pp.
- PRé Consultants (2013) *SimaPro v. 8.0. PRé Consultants*, B.V. Amersfoort, The Netherlands.
- Quirós, R., Gabarell, X., Villalba, G., Barrena, R., García, A., Torrente, J., Font, X. (2014) The application of LCA to alternative methods for treating the organic fiber produced from autoclaving unsorted municipal solid waste: case study of Catalonia. *Journal of Cleaner Production*, **107**, 516-528.

- Silva, A.C. (2014) *Análise da Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos em Capitais do Nordeste Brasileiro: O Caso de Aracaju/SE e João Pessoa/PB*, Dissertação de mestrado (Engenharia Urbana e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 156 pp.
- Silva, A.C., Nóbrega, C.C., Lins, R.B., Silva, C.M. (2014) Análise da Coleta Seletiva dos Municípios de Aracaju e João Pessoa: um passo para a gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos urbanos municipais. In: Giovanni Seabra (Org.) (Eds.), *TERRA, Saúde Ambiental e Soberania Alimentar*. 1 ed. João Pessoa, **3**, 82-83.
- Tang, Y., Ma, X., Lai, Z., Chen, Z. (2013) Energy Analysis and Environmental Impacts of a MSW Oxy-fuel Incineration Power Plant in China, *Energy Policy*, **60**, 132–141.
- Weidema, B.P., Ekvall, T. (2009) Guidelines For applications of deepened And broadened LCA:consequential LCA. Chapter For CALCAS project. Deliverable D18. Acesso em fevereiro de 2019, disponível em: http://www.lcanet.com/files/consequential_LCA_CALCAS_final.pdf
- Weidema, B. P. (2003) Market Information in LCA. Environmental Project nº 863. Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, Denmark.