

REVISTA AIDIS

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

APLICAÇÃO DA PEGADA ECOLÓGICA NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS: ESTUDO DA CIDADE DE RECIFE, BRASIL

* Amanda Rodrigues Santos Costa ¹
Rodrigo Cândido Passos Silva ¹
José Fernando Thomé Jucá ¹
Soraya Giovanetti El-Deir ²

APPLICATION OF THE ECOLOGICAL FOOTPRINT IN THE MANAGEMENT OF SOLID URBAN WASTE THROUGH ANALYSIS OF MAIN COMPONENTS: STUDY OF THE CITY OF RECIFE, BRAZIL

Recibido el 11 de septiembre de 2018; Aceptado el 7 de octubre de 2019

Abstract

The management of municipal solid waste is one of the most complex aspects for municipal managers due to the large volume generated and the cost for the treatment. Thus, tools that provide information for decision making can be useful as indicators of sustainability. The ecological footprint is an indicator of the environmental impact of a product or process and in the case of solid waste, the footprint of the main elements present in the urban flow can be calculated. The objective of this work was to identify the ecological footprint of the recyclable fraction of urban solid waste in the city of Recife, Pernambuco and to evaluate the correlation between waste footprints through analysis of main components, seeking to help in the search of information for management proposals. The waste footprint reveals that the impact of a waste in the environment is directly related to the environmental liabilities of the material, as well as its volume of generation. Through Principal Component Analysis it is possible to visualize graphically correlations between the footprints of the materials and from them to extract information for a more sustainable management proposition.

Keywords: indicators, multivariate statistics, sustainability.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil.

* *Autor correspondente:* Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife - PE - CEP: 50670-901. Brasil. Email: amandarsc@gmail.com

Resumo

A gestão de resíduos sólidos urbanos é um dos aspectos mais complexos para os gestores municipais devido ao grande volume gerado e o custo para o tratamento. Assim, instrumentos que fornecem informações para a tomada de decisão podem ser úteis, como indicadores de sustentabilidade. A pegada ecológica é um indicador do impacto ambiental de um produto ou processo e no caso de resíduos sólidos, pode ser calculada a pegada dos principais materiais presentes no fluxo urbano. O objetivo deste trabalho foi identificar a pegada ecológica da fração seca reciclável dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Recife, Pernambuco, e avaliar a correlação entre as pegadas através de análise de componentes principais, buscando auxiliar na busca de informações para propostas de gerenciamento. A pegada ecológica dos resíduos revela que o impacto de um resíduo no meio está diretamente relacionado ao passivo ambiental do material, bem como seu volume de geração. Através da Análise de Componentes Principais é possível visualizar graficamente correlações entre as pegadas dos materiais e a partir delas extrair informações para proposição de gestão mais sustentável.

Palavras chave: estatística multivariada, indicadores, sustentabilidade.

Introdução

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU), exatamente por envolver aspectos ligados às questões ambientais, sociais e econômicas, está diretamente relacionada à sustentabilidade. Esses resíduos produzidos em grande quantidade devido à expansão tecnológica e aos padrões inadequados de consumo são um dos principais contribuintes da crise ambiental, por representarem desperdício de matéria e energia, quando não reaproveitados, e pelos impactos ambientais e sociais relacionados à disposição final inadequada dos mesmos (Simatele *et al.*, 2017; Costa, 2017).

Entre as ferramentas que auxiliam o gerenciamento dos RSU, os indicadores de sustentabilidade podem atuar no monitoramento do desenvolvimento sustentável, tendo como função principal fornecer informações com fundamentação científica sobre a sustentabilidade de um sistema. Dessa maneira, funcionam como instrumentos de análise e apoio a decisão e orientação na formulação de políticas públicas, bem como no acompanhamento da eficácia destas, contribuindo para uma gestão municipal de resíduos que seja coerente, racional e transparente (Dong e Hauschild, 2017). Nessa perspectiva, podem fornecer o diagnóstico dos fatores ambientais, sociais e econômicos envolvidos no processo.

Como um indicador de sustentabilidade, contribuindo para informações da dimensão ambiental, a pegada ecológica consiste numa metodologia que quantifica fluxos de matéria-prima e energia existente num determinado sistema. É definida como a terra (ou água) biologicamente produtiva necessária para produzir os recursos consumidos pela população e absorver parte dos resíduos gerados, representando um indicador da pressão exercida sobre o ambiente (Wackernagel e Rees, 1998).

Como os resíduos sólidos urbanos refletem as quantidades e tipos de materiais consumidos pela população local, os valores da Pegada Ecológica de diferentes tipos de materiais podem ser úteis para identificar os impactos relativos destes resíduos no ambiente e, a partir da sistematização das informações, orientar para um gerenciamento mais ambientalmente adequado. Neste caso, a pegada ecológica é calculada com base no uso de energia e emissões de CO₂ obtidas pelo estudo do ciclo de vida de cada material, especificamente a fração seca reciclável dos RSU (Kissinger *et al.*, 2013; Costa, 2017).

Nesse cenário, o qual envolve problemas complexos, podem ser adotadas técnicas multivariadas para interpretação das informações coletadas pelos indicadores, visando à redução das variáveis em estudo, mas preservando as relações existentes entre os dados originais, buscando estabelecer relações entre os dados (Finkler *et al.*, 2015).

A utilização do conceito de pegada ecológica como indicador da pressão humana sobre os recursos naturais é um tema presente na pesquisa científica. Gao e Tian (2016) utilizaram a pegada ecológica para avaliar a pressão ecológica decorrente do excesso de consumo de recursos naturais na China. Galli *et al.* (2017) avaliaram a pegada ecológica do setor alimentício dos países mediterrânicos, indicando que a produção de alimentos constitui uma grande parte da pegada ecológica da região, exercendo pressão sobre os ecossistemas de dentro e fora da região e na demanda por recursos naturais. Laurenti, Moberg e Stenmark (2017) buscaram identificar a pegada ecológica dos resíduos gerados no processo de fabricação/produção de 10 produtos selecionados. Kissinger *et al.* (2013) propuseram a contabilização da pegada ecológica dos principais materiais constituintes dos bens de consumo que são encontrados nos resíduos sólidos urbanos.

Vários estudos são encontrados também com o uso de técnicas estatísticas multivariadas como ferramenta de auxílio na análise de fatores relacionados à gestão de resíduos sólidos (Olaya *et al.*, 2013; Bari *et al.*, 2014; Silva, 2015; Chu *et al.*, 2016). Savic, Jeremic e Petrovic (2016), utilizaram a análise multivariada para avaliar e modificar a metodologia de cálculo do Índice de Sociedade Sustentável (SSI). Figge, Oebels e Offermans (2017) avaliaram os efeitos da globalização sobre o meio ambiente, utilizando a pegada ecológica como indicador da pressão humana sobre o ambiente ecológico e a estatística multivariada como metodologia de análise do conjunto de informações coletadas. Verhofstadt *et al.* (2016) relacionaram a pegada ecológica e o bem-estar subjetivo de indivíduos da cidade de Flandres, Bélgica, identificando através de análises de componentes principais que a diminuição da pegada ecológica não reduziria o bem-estar das pessoas. Tais ferramentas combinadas - a pegada ecológica dos materiais e análises estatísticas multivariadas – podem auxiliar na identificação de relações e formulações de estratégias para a gestão sustentável dos resíduos.

Os objetivos desta pesquisa são: (1) identificar a pegada ecológica da fração seca reciclável dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Recife, Pernambuco; (2) avaliar a correlação das pegadas ecológicas dos resíduos selecionados através da Análise de Componentes Principais, buscando auxiliar na busca de informações para propostas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Material e métodos

A pesquisa foi desenvolvida baseada em dados da cidade de Recife, no estado de Pernambuco, a qual fica localizada no litoral da região Nordeste brasileira, com uma população estimada de 1637834 e área territorial de 218.435 km² (IBGE, 2018). O município destina os resíduos coletados em aterro sanitário particular; a coleta urbana é em sua maioria indiferenciada, com cobertura de 100% da área urbana. A coleta seletiva de materiais secos recicláveis representa apenas 0.2% do total de resíduos coletados. Estratégias e informações para a gestão sustentável dos resíduos sólidos urbanos são importantes para auxiliar a gestão municipal no processo de decisão.

Para o cálculo da Pegada Ecológica dos resíduos sólidos urbanos foram utilizados os valores propostos no estudo de Kissinger *et al.* (2013), que consideram a unidade *global hectare* – unidade de terra biologicamente produtiva – por quantidade do material, em toneladas (gha/t). Estes autores quantificaram a pegada ecológica para os materiais mais comuns da fração seca encontrados no fluxo dos resíduos sólidos urbanos (Tabela 1). Os valores foram definidos pelos autores por meio de uma revisão de estudos de Análise de Ciclo de Vida de diferentes regiões, incluindo a América Latina. No entanto, são dados aproximados e podem estar subestimados.

Tabela 1. Pegada Ecológica dos materiais mais comuns no fluxo dos resíduos sólidos urbanos.

Tipologia	Média gha/t
Vidro	0.24
PEAD	0.20
PVC	0.41
PET	0.48
Poliestireno	0.66
Aço	0.61
Jornal/Revista	2.23
Papelão	2.76
Papel	2.82
Alumínio	2.42
Têxtil	10.20

Fonte: adaptado de Kissinger *et al.* (2013)

Os dados da geração de resíduos da cidade de Recife foram obtidos do estudo de Silva (2015), referente a volumetria e gravimetria de 31 setores de coleta urbana para o ano de 2013. Esses setores estudados pelo autor compreendem bairros, de forma parcial ou total, pelos quais os caminhões coletores passam e realizam as atividades de coleta e transporte, abrangendo rotas com diferentes características socioeconômicas, de forma a representar a população total (Tabela 2).

Tabela 2. Dados dos resíduos e perfil dos setores de coleta urbano de Recife, Brasil.

Setor	Volume de Resíduo (t)									Classe	Caract.
	Vidro	PEAD	PVC	PET	Isopor	Jor./Rev.	Têxtil	Metal	Papel*		
1	1.17	9.33	0	4.90	1.40	8.63	16.34	5.37	32.90	C	Re C**
2	1.28	9.25	1.03	9.25	7.45	29.55	4.63	4.63	23.90	A	R
3	1.10	5.12	0.37	5.49	4.39	10.61	9.52	1.83	17.57	C	Re C
4	2.90	8.28	1.66	6.63	8.91	3.31	11.18	2.69	24.65	D	Re C
5	1.93	4.07	0.21	8.15	0.86	2.79	7.72	3.65	19.94	D	R
6	1.69	7.21	0.23	9.23	6.08	10.58	12.05	2.70	29.05	D	R
7	2.59	7.18	0	6.99	0.00	4.99	6.79	4.19	40.31	D	R
8	0.80	5.36	0	5.36	4.56	2.41	26.27	1.61	32.16	C	Re C
9	2.39	1.86	0	3.73	7,83	11.38	6.71	5.41	19.02	C	R
10	1.57	3.35	1.03	7.73	6.18	3.14	17.26	3.61	22.41	D	Re C
11	3.26	6.52	0.33	6.52	6.52	2.93	20.53	2.28	53.12	D	Re C
12	5.93	6.20	0	5.39	3.77	15.10	4.04	4.58	38.82	A	Re C
13	3.65	5.17	0.30	7.91	14.91	20.99	10.95	9.43	39.55	A	Re C
14	0.89	10.23	5.11	20.45	4.60	10.99	10.99	4.09	27.10	C	R
15	2.14	2.64	1.06	15.06	4.75	5.55	8.19	4.49	26.94	B	R
16	7.08	0.91	0	0.46	0.00	3.08	6.17	5.60	37.59	B	R
17	3.42	3.29	0.25	3.04	5.07	11.90	4.43	8.86	28.62	C	R
18	2.20	3.31	1.10	4.41	2.48	12.40	22.31	4.13	51.79	D	Re C
19	1.36	2.71	1.08	15.45	11.66	20.33	12.20	4.88	34.69	A	R
20	4.42	4.91	0	4.91	8.59	9.57	8.59	4.17	25.04	C	R
21	4.82	6.20	0	12.74	6.20	18.59	20.31	11.36	97.09	C	C
22	0.88	4.72	0	11.79	2.95	6.19	6.19	3.24	48.35	D	C
23	3.27	3.68	0	29.46	11.05	16.37	7.77	8.18	45.82	C	C
24	1.76	19.68	2.81	14.05	7.03	3.16	43.57	9.84	40.05	D	R
25	0.99	7.68	1.24	9.91	4.21	6.69	16.35	4.21	29.48	D	Re C
26	8.61	10.61	0.29	10.33	5.74	7.46	15.49	6.31	35.86	D	R
27	1.28	3.83	0	6.06	9.25	10.85	8.29	9.89	22.33	D	Re C
28	2.47	6.18	0.31	12.36	8.96	5.25	18.54	5.87	39.86	D	R
29	2.52	6.49	1.80	12.98	7.93	11.18	21.27	3.61	40.02	D	R
30	3.93	1.64	0	5.23	6.54	11.12	11.45	5.89	35.33	D	R
31	2.29	13.069	2.94	18.95	10.13	29.73	16.66	7.19	49.01	D	R
Total	84.60	190.69	23.15	294.92	190.0	326.82	412.76	163.79	1108.97	-	-

*Papel e Papelão; **R=Residencial e C=Comercial. Note: Classe A (mais de dez salários mínimos); Classe B (de cinco a dez salários); Classe C (de dois a cinco salários); Classe D (até dois salários).

A partir do conjunto destes dados foram obtidos os valores da Pegada Ecológica do vidro, dos plásticos PEAD, PVC e PET, do isopor, do jornal/revista, do têxtil, do metal e do papel/papelão para uma área representativa do município de Recife, Brasil. Em seguida, sobre os dados de pegada ecológica encontrados foi aplicada a Análise de Componentes Principais (ACP). Esta é uma técnica da estatística multivariada que pode ser utilizada para agrupar indivíduos (observações) de acordo com sua variação (Hongyu *et al.*, 2016). Dessa forma, permite a interpretação de dados multivariados a partir da correlação entre os parâmetros considerados (Bernadi *et al.*, 2009).

A ACP foi utilizada no estudo para avaliar a relação entre as pegadas ecológica dos resíduos na população pesquisada. A técnica foi aplicada ao conjunto de dados através da matriz de correlação das variáveis. O conjunto de variáveis originais é transformado em um outro conjunto de variáveis com a mesma dimensão, chamado de Componentes Principais (CP), os quais contém o máximo de informação contida nos dados, relativo a variância (Hongyu *et al.*, 2016).

O critério de seleção dos CP consistiu em incluir os componentes cujos autovalores próprios sejam superiores a 1, segundo o critério de Kaiser (1958). Também, consideraram-se na composição de cada CP variáveis cujas cargas fatoriais sejam maiores que 0.5, conforme realizado por Finkler *et al.* (2015). Para estas análises foi utilizado o *software* Statistica 7.0. (Costa, 2017).

Resultados e Discussão

Na Tabela 3 são apresentadas as Pegadas Ecológicas dos materiais para a área de estudo, sendo a dos resíduos têxtil seguido do papel/papelão, com média de 135.82 gha e 99.91 gha, respectivamente, as maiores no conjunto de resíduos analisados. Já os materiais vidro e o plástico PVC apresentaram os menores valores, com média de 0.65 gha e 0.31 gha, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3. Análise Descritiva da Pegada ecológica por tipo de material

Resíduos	Média (gha)	Máx. (gha)	Mín. (gha)	D.P (gha)	CV (%)
Vidro	0.65	2.07	0.19	0.45	68.26
PEAD	1.23	3.94	0.18	0.76	61.75
PVC	0.31	2.10	0.00	0.47	153.14
PET	4.57	14.14	0.22	2.86	62.71
Poliestireno/Isopor	4.04	9.84	0.00	2.28	56.31
Jornal/Revista	23.51	66.30	5.38	16.26	69.14
Têxtil	135.82	444.38	41.25	83.40	61.41
Metal	5.66	12.18	1.72	2.71	47.78
Papel/Papelão	99.91	271.32	49.10	41.97	42.00

A Pegada dos resíduos têxtil está relacionada à grande geração desse resíduo na amostra de estudo e, principalmente, ao alto valor da Pegada por tonelada deste material. Observa-se da Tabela 2 que na área estudada a geração de resíduo têxtil é de 412.76 toneladas/ano, a segunda maior. O desenvolvimento do modo de produção chamado *fast-fashion* contribui para um curto ciclo de vida do produto, contribuindo para posterior geração de resíduos (Milan *et al.*, 2010). Segundo a Fundação Ellen MacArthur, nos últimos 15 anos a indústria da moda dobrou sua produção. Em contrapartida, o tempo que uma roupa é usada antes de ser descartada diminuiu cerca de 40%. Estima-se que 73% desses resíduos não são reciclados e, portanto, ou são queimados ou levados para aterros sanitários, impactando a gestão de resíduos urbanos (World Economic Forum, 2019).

Outra possibilidade para a presença desses resíduos no fluxo urbano é a geração por parte das próprias indústrias têxtil. O Brasil, segundo estudo setorial da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT) (2013), tem quinta maior indústria têxtil do mundo e ocupa a quarta posição entre os maiores produtores mundiais de artigos de vestiários. A região metropolitana de Recife é a terceira microrregião do Estado de Pernambuco com maior presença da indústria têxtil (Andrade *et al.*, 2016). No entanto, a destinação desses resíduos industriais é de obrigação das empresas e não do município, se o descarte ocorre na coleta urbana configura uma distorção da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Já o elevado valor da Pegada Ecológica por tonelada de resíduo têxtil está atrelado ao passivo ambiental decorrente da cadeia da indústria têxtil (Costa, 2017). A Environmental Protection Agency – EPA considera esse setor como um dos quatro que mais consomem recursos naturais e que mais poluem (Martins, 2009). Esta envolve a produção da matéria-prima, as indústrias de fiação, tecelagem e acabamento, as confecções, as lavanderias industriais e o uso pelo consumidor. Nesses processos, há impactos ambientais referentes ao uso de materiais tóxicos, ao uso excessivo de água, emissão de gases de efeito estufa, geração de resíduos, consumo de energia proveniente de fontes não renováveis, entre outros (UNIETHOS, 2013). Quanto aos resíduos têxteis, existe também a problemática do tempo de decomposição lento e a produção de lixiviados, que pode contaminar a superfície e as fontes de água. No caso dos tecidos sintéticos, a decomposição pode levar centenas de anos (Machado e Leonel, 2014).

Já o alto valor encontrado de Pegada dos resíduos de papel/papelão (1108.97 t/ano) está atrelado a grande geração desse resíduo na área de estudo, a qual pode estar relacionada ao descarte desses materiais como embalagens. Tal valor pode estar relacionado ao descarte de embalagens. Isso porque, esses materiais, principalmente o papelão, têm um uso bastante elevado entre as embalagens, uma vez que o consumo deste material por habitante é significativamente superior ao consumo de embalagens fabricadas com outros materiais, segundo dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (IPEA, 2012). O jornal e a revista representam a terceira maior pegada entre os resíduos estudados e também o terceiro maior volume gerado de resíduos

na área de estudo. Esses produtos têm ciclo de vida curto e acabam sendo descartados como RSU (Costa, 2017).

Os resíduos plásticos de PET (tereftalado de polietileno) apresentaram também grande volume gerado na amostra: aproximadamente 295 toneladas. O uso desse material também está associado à produção de embalagens, especialmente as garrafas plásticas. No geral, os resíduos plásticos têm baixa taxa de reciclagem, no entanto, o PET apresenta melhores resultados, ainda que na área estudada não tenha significado grande redução do volume que é coletado pelos serviços públicos. Já o plástico PEAD (polietileno de baixa densidade) e o isopor (poliestireno) tiveram uma geração de aproximadamente 190 toneladas e uma pegada ecológica média de 1.23 gha e 4.04 gha, respectivamente. O PEAD é um plástico mais resistente e pode ser encontrado em tampas de refrigerantes, brinquedos, eletrodomésticos, entre outros. Os resíduos do isopor de fonte doméstica é devido, principalmente, ao seu uso em embalagens, como bandejas e suportes para alimentos, os quais também apresentam ciclo de vida curto e são descartados como resíduos domésticos.

Os menores registros de Pegada Ecológica foram para os resíduos de vidro (0.65 gha) e PVC (0.31 gha), isso devido aos baixos valores da geração destes resíduos na amostra analisada. O vidro tem um quantitativo pouco expressivo, porque participa de forma ativa na cadeia de reciclagem de RSU, sendo interceptada por catadores de materiais recicláveis, não representando, de forma real, a geração deste resíduo pela população, como sugere Silva (2015). O alumínio, que está incluído na tipologia metal, também possui esta característica. Este resíduo tem elevado poder de reciclagem, ou seja, praticamente 100% do material podem ser reaproveitados, e possui o maior valor de mercado dentro da cadeia da reciclagem (Godecke, 2014). Desta forma, observa-se que o valor da pegada ecológica do material vai depender da quantidade gerada e reciclada dos resíduos, bem como do valor base de cálculo, que está relacionado ao impacto do componente no meio ambiente.

Análise de Componentes Principais

Seguindo o critério de Kaiser, considerando os autovalores maiores que a unidade, os três primeiros componentes na Análise de Componentes Principais para o conjunto dos dados foram considerados significativos (Tabela 4). Desta forma, estes três explicam 67.88% da variação dos dados.

De acordo com os resultados da Tabela 5, a primeira componente foi atribuída, principalmente, às Pegadas dos plásticos (PEAD, PVC, PET). Assim, este primeiro componente distingue setores de coleta com valores mais significativos para a Pegada destes parâmetros. Já a segunda componente é formada, com maior peso, pelas variáveis vidro e metal, relacionando a setores com características predominantemente comerciais. A terceira componente é formada pelos

parâmetros pegada do papel/papelão e do têxtil, distinguindo também setores com características comerciais.

Tabela 4. Proporção e proporção acumulativa da variância explicada por cada componente principal

Componente Principal	Autovalores	Proporção (%)	Proporção Acumulativa (%)
CP1	2.69	29.88	29.88
CP2	1.93	21.43	51.32
CP3	1.49	16.56	67.88
CP4	0.74	8.17	76.05
CP5	0.72	8.00	84.04
CP6	0.56	6.23	90.27
CP7	0.45	5.01	95.28
CP8	0.31	3.40	98.68
CP9	0.12	1.32	100.00

Tabela 5. Cargas fatoriais das variáveis para as componentes principais selecionadas.

Parâmetros	Componente 1 (Fator 1)	Componente 2 (Fator 2)	Componente 3 (Fator 3)
Vidro	0.136	0.598	-0.471
PEAD	-0.672	-0.430	-0.283
PVC	-0.631	-0.541	0.178
PET	-0.729	-0.017	0.262
Isopor	-0.558	0.359	0.423
Jornal/Revista	-0.509	0.502	0.461
Têxtil	-0.516	-0.427	-0.573
Metal	-0.523	0.592	-0.215
Papel/Papelão	-0.423	0.423	-0.568

Observou-se, através da projeção polar das cargas das variáveis associadas às duas primeiras componentes, que juntas explicam 51.32% da variação, a formação de dois grupos, os quais apresentam variáveis com forte correlação entre si devido ao fato de estarem juntas e na mesma direção (Figura 1). No segundo quadrante, há o grupo formado pelo metal, jornal/revista, papel/papelão e isopor. No terceiro quadrante, há o grupo formado pelo PEAD, PVC e têxtil. O vidro, isolado no primeiro quadrante, e o PET não apresentam correlação entre si, e este último, apresenta baixa variabilidade dos dados nesta Componente.

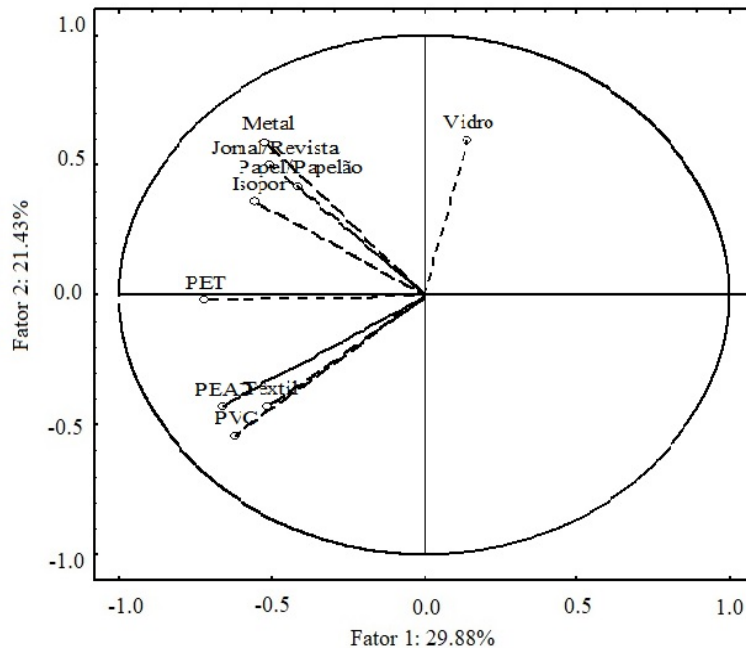


Figura 1. Projeção espacial da ordenação dos vetores das variáveis gravimétricas da Pegada ecológica nas duas primeiras componentes principais.

A análise da projeção entre as componentes 2 e 3 mostra a formação de grupos com maior correlação, no primeiro quadrante, entre as variáveis Pegada do jornal/revista e isopor; o PEAD e o têxtil no terceiro quadrante; e o metal, vidro e papel/papelão no quarto quadrante (Figura 2). O plano de projeção das variáveis nos fatores 1 e 3 confirma os plásticos mais próximos ao fator 1, bem como o isolamento do vidro, mostrando baixa correlação com as demais variáveis. É possível observar também a formação de grupos de variáveis mais intensamente correlacionadas, sendo o jornal/revista, isopor, PET e PVC no segundo quadrante; e o PEAD, metal, têxtil e papel/papelão no terceiro quadrante (Figura 3).

Avaliando as correlações das variáveis nas três componentes é possível concluir que as pegadas dos resíduos do jornal/revista e do isopor apresentou correlação entre si, bem como do metal e do papel/papelão. Observa-se que estes últimos materiais compõem elementos de embalagens e podem ser encontrados em conjunto no descarte das mesmas, além de que resíduos de embalagens também estão associados a elevação do consumo, que por sua vez está relacionado ao aumento da geração de resíduos e seus impactos. Também apresentaram forte relação entre si os resultados de pegada ecológica do resíduo têxtil e do PEAD.

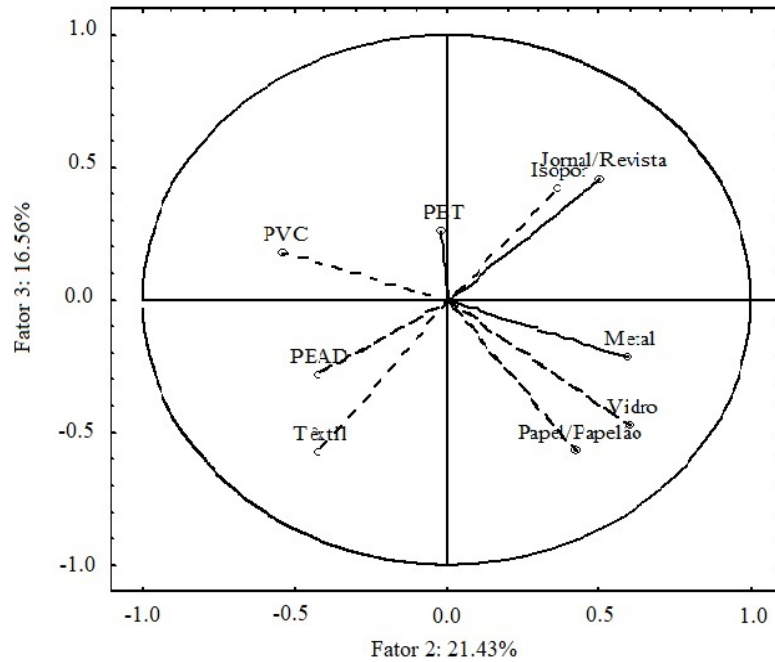


Figura 2. Projeção espacial da ordenação dos vetores das variáveis gravimétricas da Pegada ecológica entre a segunda e terceira componentes principais

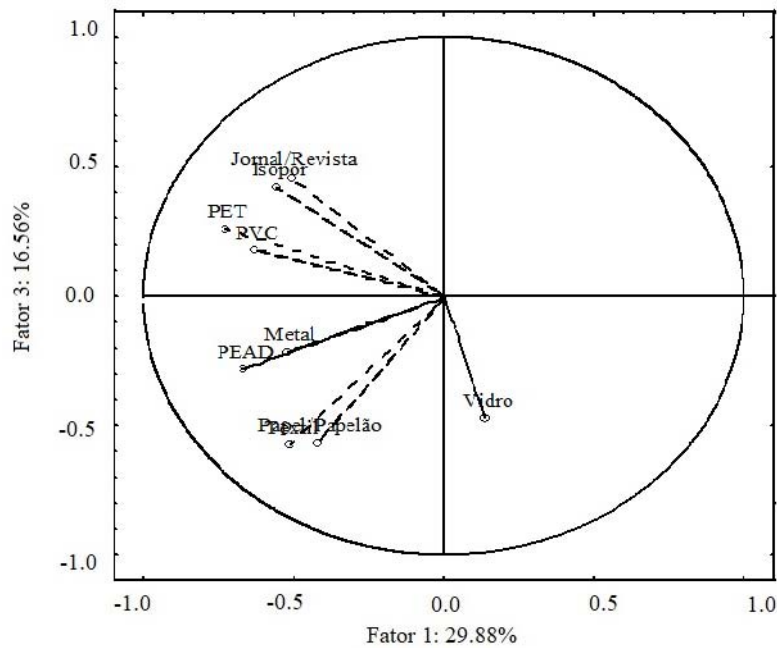


Figura 3. Projeção espacial da ordenação dos vetores das variáveis gravimétricas da Pegada ecológica entre a primeira e terceira componentes principais

Estas correlações também podem estar associadas à geração destes resíduos em locais comuns, ou seja, uma similaridade na geração desses resíduos dentro dos setores de coleta analisados.

Considerando que a pegada ecológica é um indicador de impacto de determinado produto ou serviço no meio ambiente, os resultados apresentados podem ser utilizados como instrumento de auxílio para os gestores de resíduos do município. Os resíduos que estão associados podem ser, por exemplo, gerenciados de maneira conjunta a fim de reduzir este impacto. Dessa forma, campanhas educativas, pontos de entrega voluntária desses resíduos ou cooperativas de reciclagem podem ser pensadas considerando informações que analisem relações entre a geração, indicadores, locais de tratamento, entre outras variáveis. Para tanto, o uso de técnicas de análises estatísticas multivariadas pode ser importante aliada do gerenciamento.

Conclusão

Este estudo trata em utilizar a pegada ecológica na gestão de resíduos sólidos urbanos para auxiliar na tomada de decisão por parte dos gestores e motivar a população quanto a um consumo consciente dos recursos. Através desse indicador é possível estabelecer uma relação entre os resíduos a fim de que medidas de gestão ambiental sejam pensadas a partir de particularidades identificadas, contribuindo para que municípios coloquem em prática suas agendas de desenvolvimento sustentável.

Observou-se que os materiais com maior pegada ecológica foram os resíduos têxteis, o de papel/papelão e jornal/revista, o primeiro por causa do passivo ambiental destes materiais, o segundo e terceiro por causa do volume, indicando que o impacto de um resíduo no ambiente tem relação com estas características. A análise dos componentes principais indica que entre a Pegada dos resíduos de PET e de vidro há pouca correlação ao passo que o PEAD e o têxtil apresentam correlação positiva, bem como o jornal/revista e o isopor e metal e o papel/papelão. As análises de correlação, ao passo que indicam associação entre as variáveis em estudo, constituem ferramentas que fornecem novas informações para a gestão pública guiar políticas para a sustentabilidade da gestão dos resíduos sólidos urbanos. A análise de componentes principais mostrou-se ser um método claro graficamente, possibilitando a compreensão da correlação entre um conjunto de variáveis de forma simultânea.

Referências bibliográficas

- ABIT, Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecções. Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira. (2013) cenários, desafios, perspectivas e demandas. Brasília: ABIT, 44p. Acesso em 25 de janeiro de 2017, disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/cartilha-industria-textil>
- Andrade, B. A., Rocha R. M., Moura, K. H. L. (2016) Space distribution of textile and clothing industry in Pernambuco: what is the influence of locational factors? *Revista Economia e Desenvolvimento*, **15**, 93-112.

- Bari, M. L., Mata, H. T. C., Wanderley, L. A. (2014) Gestão de resíduos nos estados/municípios brasileiros: avaliação e análise dos procedimentos para a escolha do modelo de gestão ambiental. *Nexus Econômicos*, **8**(2), 107-121.
- Bernardi, J. V. E., Lacerda, L. D., Dórea, J. G., Landim, P. M. B., Gomes, J. P. O., Almeida, R., Manzatto, A.G., Bastos, W.R. (2009) Aplicação da análise das componentes principais na ordenação dos parâmetros físico-químicos no alto Rio Madeira e afluentes, Amazônia Ocidental. *Geochimica Brasiliensis*, **23**(1) 79-90.
- Chu, Z., Wu, Y., Zhou, A., Huang, W.C. (2016) Analysis of influence factors on municipal solid waste generation based on the multivariable adjustment. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **35**(6), 1629-1633.
- Costa, A. R. S. (2017) Análise da gestão dos resíduos sólidos urbanos da cidade do Recife-PE a partir de indicadores de sustentabilidade. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- Dong, Y., Hauschild, M. Z. (2017) Indicators for environmental sustainability. *Science Direct*, **61**, 697-702.
- Figges, L., Oebels, K., Offermans, A. (2017) The effects of globalization on Ecological Footprints: an empirical analysis. *Environment, Development and Sustainability*, **19** (3), 863-876.
- Finkler, N. R., Peresin, D., Cocconi, J., Bortolin, T. A., Rech, A., Schneider, V. E. (2015) Qualidade da água superficial por meio de análise do componente principal. *Rev. Amb. Água*, **10**(4), 784-792.
- Galli, A., Iha, K., Halle, M. et al. (2017) Mediterranean countries' food consumption and sourcing patterns: An Ecological Footprint viewpoint. *Science of the total environment*, **578**, 383-391.
- Gao, J, Tian, M. (2016) Analysis of over-consumption of natural resources and the ecological trade deficit in China based on ecological footprints. *Ecological Indicators*, **61**, 899-904.
- Godecke, M. V. (2014) Uma análise de mercado dos principais recicláveis no Brasil. *EcoDebate*, artigo.
- Hair, J. F. et al. (2009) *Análise multivariada de dados*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman.
- Hongyu, K., Sandanielo, V. L. M., Oliveira Junior, G. J. (2016) Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *Engineering and Science*, **5**(1), 83-90.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. Recife. Acesso em 07 de setembro de 2018, disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>.
- IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada. (2012) *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos*. 82 pp.
- Machado, P. G. S., Leonel, J. N. (2014) Práticas de reciclagem de resíduos têxteis: uma contribuição para a gestão ambiental no Brasil. *Competência*, **7**(1), 129-145.
- Martins, R. P. (2009) *Moda comprometida com a Responsabilidade Ecológica e Social – Várias Abordagens*. 124 f. Dissertação (Mestrado em Design de Moda), Faculdade de Artes e Letras, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Milan, G. S., Vittorazzi, C., Reis, Z. C. (2010) A redução de resíduos têxteis e de impactos ambientais: um estudo desenvolvido em uma indústria de confecções do vestuário, *13 Seminários em administração*, São Paulo.
- Kaiser, H. F. (1958) The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, **23**(3), 187-200.
- Kissinger, M., Sussman, C., Moore, J., Rees, W. E. (2013) Accounting for the Ecological Footprint of materials in consumer goods at the urban scale. *Sustainability*, **5**, 1960-1973.
- Laurenti, R., Moberg, A., Stenmarck, A. (2017) Calculating the pre-consumer waste footprint: A screening study of 10 selected products. *Waste Management & Research*, **35**, 65-78.
- Lyra, W. S.; Silva, E. C.; Araújo, M. C. U.; Fragoso, W. D. (2010) Classificação periódica: um exemplo didático para ensinar Análises de Componentes Principais. *Revista Química Nova*, **33**(7), 1594-1597.
- Olaya, J, Ippolito, K, Moreno, G. et al. (2013) Asociaciones entre la composición socioeconómica familiar y la generación urbana de residuos sólidos domiciliarios. *Revista EIA*, **10**(20), 127-137.
- Santo, R. E. (2012) Utilização da Análise de Componentes Principais na compressão de imagens digitais. *Einstein*, **10**(2), 135-139.
- Savic, D, Jeremic, V, Petrovic, N. (2016) Rebuilding the Pillars of Sustainable Society Index: A Multivariate Post Hoc I-Distance Approach. *Problems of Sustainable Development*, **12**(1), 125-134.

- Silva, R. C. P. (2015) *Avaliação do modelo de gestão dos RSU da cidade de Recife/PE e estudo dos indicadores gerenciais nos setores de coleta por meio de técnicas multivariadas*. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Simatele, D. M., Dlamini, S., Kubanza, N. S. (2017) From informality to formality: Perspectives on the challenges of integrating solid waste management into the urban development and planning policy in Johannesburg, South Africa. *Habitat International*, **63**, 122-130.
- Verhofstadt, E, Van Ootegem, L, Defloor, B, Bleys, B. (2016). Linking individual's ecological footprint to their subjective well-being. *Ecological Economics*, **127**, 80-89.
- UNIETHOS. (2013) *Sustentabilidade e Competitividade na Cadeia da Moda*. São Paulo: UNIETHOS, 82 p. Acesso em 25 de janeiro de 2017, disponível em: <https://www.abit.org.br/noticias/noticia10878>
- Wackernagel, M., Rees, W. (1996) *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers.
- World Economic Forum (2019) *Fashion has a huge waste problem. Here's how it can change*, by Foundation Ellen MacArthur. Acesso em 26 de abril de 2019, disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2019/02/how-the-circular-economy-is-redesigning-fashions-future/>