Análise de sensibilidade exploratória do fator de efeito para a categoria de impacto formação de material particulado na AICV

Exploratory sensitivity analysis of the effect factor for particulate matter formation impact category in LCIA

Gabriela Roiko Cheli (orientada)*, Yara de Souza Tadano (orientadora)†, Letícia Yuriko Togawa‡, Gabriela Giusti§, Diogo Aparecido Lopes Silva¶,

RESUMO

A terceira etapa da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), utiliza modelos de caracterização para calcular Fatores de Caracterização, que mensuram o nível de impacto ambiental dentre as categorias de impacto selecionadas. A maioria dos modelos de caracterização para a categoria de impacto formação de material particulado foram desenvolvidos voltados a países que possuem características geográficas e sociais diferentes do Brasil e dificilmente levam em conta informações do contexto brasileiro na modelagem. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise de sensibilidade exploratória para o fator de efeito do modelo de Fantke et al. (2019). Para tanto, foi desenvolvida uma análise minuciosa dos cálculos envolvidos no modelo, selecionadas algumas variáveis de cálculo, e alterados os valores originais dessas variáveis para algumas cidades brasileiras utilizando bases de dados do Brasil. A partir disso, obtiveram-se alterações desde -6,55% até 100% nos valores finais dos fatores de efeito. Os resultados deste trabalho apontam a importância de realizar estudos com dados mais próximos à realidade do país, para tornar as pesquisas de AICV aplicadas no Brasil mais fidedignas, pois as diferenças no resultado dos fatores com alterações das variáveis de cálculo foram significativas.

Palavras-chave: material particulado, fator de efeito, Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, análise de sensibilidade.

ABSTRACT

The third phase of the Life Cycle Assessment (LCA), the Life Cycle Impact Assessment (LCIA), uses characterization models to calculate Characterization Factors that measure the impact level to the considered impact categories. Most of these models for particulate matter formation impact category were developed considering countries with different social and geographic characteristics from Brazil and rarely considered Brazilian context information in its modeling. In this regard, this work aims to perform an exploratory sensibility analysis of the effect factor of the Fantke et al. (2019) model. To do so, a detailed analysis of the calculus evolved in the model was developed, some variables were selected, and the original values for some Brazilian cities were changed. From that, it was obtained alterations from -6,55 to 100% on the final effect factor values. This work results indicate the importance of conducting studies with a database closer to the country reality to turn the LCIA researches applied to Brazil more reliable since the differences in the results after the variables changes were significant.

Keywords: particulate matter, effect factor, Life Cycle Impact Assessment, sensibility analysis.

* Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; gabcheli@hotmail.com
† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; yaratadano@utfpr.edu.br
‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; leticia_yuriko@hotmail.com
§ Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil; gabriela.giusti@hotmail.com
¶ Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil; diogo.apls@ufscar.br

1 INTRODUÇÃO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que mensura os potenciais impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida de um determinado produto ou serviço, englobando todas as suas etapas de produção e utilização (IBICT, 2019). A Avaliação de Impacto do Ciclo de vida (AICV), terceira etapa de desenvolvimento de uma ACV, relaciona os fluxos de inventário do ciclo de vida com os seus potenciais impactos. Essa relação é feita por meio de Fatores de Caracterização (FC), obtidos através de modelos de caracterização, que são responsáveis por mensurar o nível de impacto de aspectos ambientais para determinadas categorias de impacto (ABNT ISO, 2009).

Neste sentido, a categoria de impacto formação de material particulado vem sendo estudada no Brasil pela Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (RAICV), criada em 2014 (ALMEIDA NETO; LINS; ALVARENGA, 2016). Os modelos já existentes para essa categoria de impacto abrangem principalmente o continente da Europa e América do Norte, regiões que possuem uma realidade diferente do Brasil, como características geológicas, socioeconômicas e de clima distintas. O Material Particulado (MP) é constituído de partículas micrométricas que influenciam negativamente nos impactos ambientais e, principalmente, na saúde humana (HAUSCHILD; HUIJBREGTS, 2015).

A obtenção do FC depende de outros dois fatores: o Fator de Efeito (FE) e o Fator de Inalação (FI). O FE foi aprofundado neste trabalho com a finalidade de uma análise minuciosa do modelo de Fantke et al. (2019), recomendado por Giusti (2021) para ser utilizado em estudos de AICV no Brasil.

Dito isso, a partir da análise do FE, a pergunta norteadora desta pesquisa foi: como dar continuidade às pesquisas referentes à categoria de impacto formação de material particulado na AICV e obter FC mais condizentes com a realidade brasileira?

Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise de sensibilidade exploratória para a categoria de impacto formação de material particulado na AICV, focando na análise do FE.

Os objetivos específicos englobam selecionar os parâmetros mais relevantes no cálculo do FE, para a categoria de impacto formação de material particulado, aplicar uma análise de sensibilidade exploratória em variáveis relevantes do modelo, e discutir os resultados obtidos com os fatores originais do modelo de Fantke et al. (2019).

2 MÉTODO (OU PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DA PESQUISA)

Com o intuito de verificar as variáveis utilizadas para o cálculo do FE que possuem mais influência no resultado, realizou-se uma análise de sensibilidade exploratória para alguns dados de entrada que podem alterar conforme a cidade ou região considerada.

As variáveis utilizadas no cálculo do FE do modelo de Fantke et al. (2019) são: Mortalidade total da cidade (Mortes/ano); Número de pessoas expostas por cidade (nº de pessoas); Taxa de respiração média por pessoa (m^3/pessoa/dia); Fator de severidade por grupo etário do país (DALY -do inglês *Disability Adjusted Life Years*- ou YLL/morte -do inglês *Years of Life Lost*); Concentração de exposição de $MP_{2,5}$ por cidade ($\mu g/m^3$); Coeficientes Alfa (adimensional), Beta (%/ $\mu g/m^3$) e Delta (adimensional) (utilizados na obtenção do Risco Relativo) e Concentração de exposição de risco mínima ($\mu g/m^3$) (CHELI et al., 2021).

A partir da análise destas variáveis, foram selecionadas três para a análise de sensibilidade: concentração de exposição de $MP_{2,5}$ por cidade (C); número de pessoas expostas (Npop); e mortalidade total da cidade

($M_{MP2,5}$). Estas variáveis tiveram seus valores alterados em 10, 50 e 100%, a fim de observar a sensibilidade do FE frente a elas. As outras variáveis do modelo não foram utilizadas para essa análise.

Cinco cidades brasileiras distintas foram selecionadas aleatoriamente para realizar essa análise de sensibilidade exploratória. As cidades inclusas neste estudo foram: Campinas (SP); Curitiba (PR); Montes Claros (MG); Praia Grande (SP); e São Paulo (SP).

Essa análise foi realizada para os FE calculados em DALY/kg de poluente inalado, sendo que DALY é uma sigla em inglês para "anos de vida perdidos por incapacidade". O cálculo foi desenvolvido para as abordagens marginal e média, conforme as Eq. (1) e (2) de Fantke et al. (2019), respectivamente:

$$FE^{marginal} = \frac{dM_{MP2,5,j}}{dI_j} \times FS_{i,r} = \frac{\sum_{i,j}\left[\left(RR_i(C_j+\Delta C_j) - RR(C_j)\right) \times \frac{M_{i,r}}{RR_i(C_r)\times N_{pop,r}} \times FS_{i,r}\right]}{\Delta C_j \times BR \times f_1 \times f_2} \quad (1)$$

$$FE^{médio} = \frac{M_{MP2,5}(C_j) - M_{MP2,5}(C_0)}{I(C_j) - I(C_0)} \times FS_{i,r} = \frac{\sum_{i,j}\left[\left(RR_i(C_j) - 1\right) \times \frac{M_{i,r}}{RR_i(C_r)\times N_{pop,r}} \times FS_{i,r}\right]}{(C_j - C_0) \times BR \times f_1 \times f_2} \quad (2)$$

Nas Eq. (1) e (2) tem-se que: FE = fator de efeito (DALY/kg $MP_{2,5}$ inalado ou YLL/kg $MP_{2,5}$ inalado); $M_{MP2,5}$ = mortalidade atribuída à exposição ao $MP_{2,5}$ (mortes/ano); M = mortalidade geral (mortes/ano); I = inalacão (kg/ano); RR = risco relativo, o qual é uma função em relação à concentração (sem dimensão); N_{pop} = população exposta (pessoas); BR = taxa média populacional de respiração (m^3/pessoa/dia); FS = fator de severidade, o qual pode ser por mortalidade (YLL/morte) ou por mortalidade e morbidade (DALY/morte); C_0 = nível de exposição de risco mínimo teórico (µg/m^3); C = concentração de exposição de $MP_{2,5}$ (µg/m^3); f_1 = fator de conversão de dia para ano; f_2 = fator de conversão de kg para µg. Os subíndices são definidos como; i = doença; j = cidade; r = região.

A abordagem marginal faz o cálculo considerando a variação dos impactos na saúde humana devido à um acréscimo infinitesimal na concentração de material particulado no ambiente, servindo principalmente para estudos de ACV que objetivam avaliar pequenas mudanças de emissões deste poluente. Já a abordagem média considera a mudança do impacto na saúde humana por uma emissão de material particulado acima de uma concentração de *background*, considerando que para concentrações abaixo dessa linha de base não são observados impactos na saúde humana (OBERSCHELP et al., 2020).

Os cálculos dos FE foram desenvolvidos em uma planilha eletrônica automatizada, disponível no próprio modelo de Fantke et al. (2019), na qual foram alterados apenas os valores desejados e coletados os resultados de FE. Ao final, foi observado o comportamento do resultado dos FE originais com a variação de cada uma das variáveis modificadas, em percentuais.

3 RESULTADOS

A variável concentração de exposição (C) foi a primeira a ser analisada para cada cidade e, o resultado da análise de sensibilidade é apresentado na Tab. 1.

Pode-se perceber que, para todas as cidades e percentuais de variação no dado de entrada de concentração, o FE teve também variações consideráveis. Para todas as cidades, ao aumentar a C em 10, 50 ou 100%, o FE teve uma redução em seu valor.

Tabela 1 – Análise de sensibilidade para a variável concentração de exposição para as cidades selecionadas

% sensibilidade	Campinas (%)	Curitiba (%)	Montes Claros (%)	Praia Grande (%)	São Paulo (%)	Média Geral (%)
10						
FE marginal	-6,55	-7,06	-22,42	-6,77	-53,64	-19,29
FE médio	-7,56	-8,84	-42,76	-6,68	-53,42	-23,85
50						
FE marginal	-25,90	-26,01	-63,19	-23,47	-62,31	-40,18
FE médio	-26,36	-29,91	-78,40	-24,18	-62,43	-44,26
100						
FE marginal	-37,96	-39,80	-71,59	-36,83	-68,65	-50,97
FE médio	-38,92	-42,93	-84,86	-36,64	-68,62	-54,39

Fonte: Autoria própria (2020).

Os resultados da análise para a variação do N_{pop} estão apresentados na Tab. 2. Pode-se observar que a variação dos dados de N_{pop}, também causam um impacto nos resultados de FE, porém com menor variação do que com a de C, como mostra a média geral das Tab. 1 e 2. Essa variação percentual ao alterar N_{pop} é igual para todas as cidades nos três casos de alteração, enquanto as variações dos resultados de FE para alterações em C são distintas.

Tabela 2 – Análise de sensibilidade para a variável população exposta para as cidades selecionadas

% sensibilidade	Campinas (%)	Curitiba (%)	Montes Claros (%)	Praia Grande (%)	São Paulo (%)	Média Geral (%)
10						
FE marginal	-9,09	-9,09	-9,09	-9,09	-9,09	-9,09
FE médio	-9,09	-9,09	-9,09	-9,09	-9,09	-9,09
50						
FE marginal	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33
FE médio	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33
100						
FE marginal	-50	-50	-50	-50	-50	-50
FE médio	-50	-50	-50	-50	-50	-50

Fonte: Autoria própria (2020).

A Tabela 3 apresenta a análise de sensibilidade para a variável mortalidade ($M_{MP2,5}$) das cidades selecionadas.

Ao observar a Tabela 3, percebe-se que, das três variáveis, a $M_{MP2,5}$ é a única que faz com que o FE aumente. Isso se justifica pela análise das Eq. (1) e (2), que permitem observar que a mortalidade é a única variável diretamente proporcional ao FE, enquanto C e N_{pop} são inversamente proporcionais. Outro ponto a ser observado é que o FE aumenta exatamente na mesma porcentagem em que a $M_{MP2,5}$ foi alterada.

Tabela 3 – Análise de sensibilidade para a variável mortalidade para as cidades selecionadas

% sensibilidade	Campinas (%)	Curitiba (%)	Montes Claros (%)	Praia Grande (%)	São Paulo (%)	Média Geral (%)
10						
FE marginal	10	10	10	10	10	10
FE médio	10	10	10	10	10	10
50						
FE marginal	50	50	50	50	50	50
FE médio	50	50	50	50	50	50
100						
FE marginal	100	100	100	100	100	100
FE médio	100	100	100	100	100	100

Fonte: Autoria própria (2020).

A partir da análise de sensibilidade realizada para as variáveis C, N_{pop} e $M_{MP2,5}$, pode-se observar o aumento e redução dos resultados do modelo, de acordo com a relação de cada uma das variáveis com o FE nas Eq. (1) e (2), sendo diretamente ou inversamente proporcional. Porém, também é observado que, ao se alterar o valor de C, o FE varia de forma diferente para cada situação, enquanto, para as variáveis N_{pop} e $M_{MP2,5}$, o valor dessa variação é o mesmo para todas as cidades para cada porcentagem analisada (10, 50 e 100). Isso ocorre devido a relação linear ou não-linear dessas variáveis com o FE.

Assim, esse trabalho evidenciou que alterações de 10% nos valores de entrada das variáveis do modelo avaliado são suficientes para variar os resultados dos FE para o Brasil, em uma média de 15% (para mais ou para menos). Levando em consideração a falta de um modelo específico para o cenário brasileiro, identifica-se a necessidade de utilizar dados mais próximos da realidade do país, a fim de trazer resultados de FE e, consequentemente, também de FC, mais adequados para o Brasil.

4 CONCLUSÃO

A partir de todas as análises realizadas foi possível concluir que ainda são necessários estudos mais aprofundados voltados à categoria de impacto formação de material particulado no Brasil. Com o presente estudo, comprovou-se que, ao utilizar dados muito distorcidos da realidade do país, o resultado terá alterações significativas, o que indica que sempre se deve buscar dados mais próximos a realidade do país, para que os valores de FE estejam cada vez mais próximos aos impactos reais do $MP_{2,5}$ naquele local.

O modelo de Fantke et al. (2019) foi apresentado como o modelo com dados mais próximos a realidade brasileira (GIUSTI, 2021), o que fortalece a necessidade de mais estudos exploratórios sobre o tema. É sugerida uma regionalização exploratória para comparar os resultados do presente modelo com resultados obtidos a partir de dados coletados em órgãos nacionais e confiáveis, a fim de trazer análises mais detalhadas e fidedignas ao país.

Por fim, também é necessário estudar minuciosamente as variáveis para o cálculo do fator de efeito no modelo de Fantke et al. (2019). Essa análise permitiria um melhor entendimento no comportamento de cada uma das variáveis envolvidas, a sua relação com os dados no Brasil e a sua influência no fator de efeito.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA NETO, José Adolfo; LINS, Ittana de Oliveira; ALVARENGA, Rodrigo Augusto Freitas de. **Recomendação de Métodos de Contabilização de Recursos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 5. Fortaleza, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040/2009**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

CHELI, Gabriela Roiko. et al. **Regionalização Parcial do Fator de Efeito para a Categoria de Impacto Formação de Material Particulado na AICV**. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA, Gramado, 2021.

FANTKE, Peter. et al. **Global Effect Factors for Exposure to Fine Particulate Matter**. Environmental Science & Technology 53: 6855−6868. 2019.

GIUSTI, Gabriela. **Regionalização no contexto brasileiro de modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida para a categoria de formação de material particulado.** 2021. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Recursos Renováveis, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2021.

HAUSCHILD, Michael Zwicky; HUIJBREGTS, Mark Antonius Jan. **Life Cycle Impact Assessment. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment:** Chapter 6: Particulate Matter Formation, [S.l.],97-114, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Histórico da ACV**. Brasília, 2019. Disponível em <http://acv.ibict.br/acv/historico-da-acv/>. Acesso em 22 maio 2019.

OBERSCHELP, Christopher; PFISTER, Stephan; HELLWEG, Stefanie. **Globally Regionalized Monthly Life Cycle Impact Assessment of Particulate Matter.** Environmental Science & Technology 54: 16028-16038. 2020.