

## Avaliação de modelos de caracterização para material particulado – Fatores de Inalação

## Evaluation of characterization models for particulate matter – Intake Factor

### RESUMO

Leticia Yuriko Togawa  
[leticiatogawa@alunos.utfpr.edu.br](mailto:leticiatogawa@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Yara de Souza Tadano  
[yaratadano@utfpr.edu.br](mailto:yaratadano@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

A etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), dentro da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), analisa e interpreta os potenciais impactos ambientais a partir de modelos de caracterização. Países desenvolvidos possuem os estudos concretizados, considerando, em sua grande maioria, características próprias das suas regiões. Entretanto, esses modelos geralmente não levam em conta a diversidade das regiões brasileiras e tampouco suas características específicas. Na motivação de aperfeiçoar e desenvolver modelos de diferentes categorias de impacto, que sejam apropriados para o Brasil, foi criada a Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (RAICV). Uma das categorias estudadas pela RAICV é a de formação do material particulado (MP). Este trabalho possui como objetivo eleger um modelo desta categoria para ser utilizado no desenvolvimento dos estudos de AICV no Brasil, avaliando 5 modelos. Para isso, serão utilizados três critérios de análise: escopo, robustez científica e presença de fator de caracterização para o Brasil. O modelo de Van Zelm *et al.* (2016) foi recomendado para a abordagem geográfica e o modelo de UNEP e SETAC (2016), para a abordagem por arquétipos, todavia são necessárias avaliações de outros modelos disponíveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fator de Inalação. Modelos de caracterização. Poluição Atmosférica.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

### ABSTRACT

The Life Cycle Impact Assessment (LCIA) stage analyzes and interprets the potential environmental impacts from characterization models. Developed countries have completed their studies, considering for the most part, the particularities of their regions. However, these models generally do not take into account the diversity of the Brazilian regions or their specific characteristics. In order to improve and develop models of different impact categories, which are appropriate for Brazil, the Life Cycle Impact Assessment Research Network (RAICV) was created. One of the categories studied by the RAICV is the particulate matter (PM). This work aims to choose a model of this category to be used in the development of the studies of AICV in Brazil, evaluating 5 models. Three analysis criteria will be used: scope, scientific robustness and the presence of a characterization factor for Brazil. For the geographical approach, the Van Zelm *et al.* (2016) model was recommended. For the archetypal approach, UNEP and SETAC (2016) model was recommended. However, there are other available models that need to be evaluated.

**KEYWORDS:** Intake factor. Characterization models. Atmospheric pollution.



## INTRODUÇÃO

Discussões ambientais têm se tornado cada vez mais frequentes e vêm adquirindo cada vez mais protagonismo na conjuntura atual. Com isso, muitas organizações estão buscando alternativas na tecnologia, além de procurar entender melhor os impactos gerados pelos seus próprios processos produtivos.

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é muito utilizada para a melhor compreensão desses impactos e pode ser definida como uma técnica de gestão ambiental estruturada, e internacionalmente padronizada, que enfoca na quantificação dos aspectos e impactos ambientais potenciais associados aos produtos ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, esta técnica foi padronizada pela Organização Internacional de Normalização (ISO) e é realizada em quatro etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário de ciclo de vida (ICV), avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados (ABNT, 2009a).

A AICV é a etapa que faz a ligação entre o inventário com os potenciais impactos do sistema de produto utilizando modelos de caracterização (EC-JCR, 2011 e Hauschild e Huijbregts, 2015).

Modelos de caracterização de AICV foram desenvolvidos tanto em escala global, continental, como regional, em diversas regiões do mundo todo. Todavia, no Brasil, utilizam-se metodologias e modelos que foram desenvolvidos para outros países, que possuem características climáticas, populacionais, entre outras, diferentes do Brasil.

Por isso, com a intenção de aperfeiçoar e desenvolver modelos de AICV adaptados à realidade brasileira foi criada a Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (RAICV) por pesquisadores de diferentes instituições nacionais (RAICV, 2019). A RAICV estuda diversas categorias de impacto relevantes à realidade brasileira, sendo uma delas a de material particulado (MP). Neste sentido, o presente estudo tem por objetivo avaliar cinco modelos de caracterização para a categoria de material particulado, no intuito de identificar o mais adequado a ser aplicado em estudos de ACV no Brasil.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para um melhor entendimento dos efeitos do material particulado, a Figura 1 ilustra a rota de impacto para os efeitos causados à saúde humana devido à exposição ao MP<sub>2,5</sub>. Não só mostrando como o fator de inalação (iF) está diretamente relacionado à emissão, transporte e dispersão do material particulado, como também estão destacados os processos que possuem relação com o iF.

Figura 1 – Cadeia de causa-efeito para avaliar os efeitos na saúde humana enfatizando a exposição ao MP<sub>2,5</sub> na Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida



Fonte: Traduzido e adaptado de Humbert *et al.* (2011)

A cadeia de causa-efeito inicia-se na emissão de uma substância para o ar. Podendo ser o próprio material particulado, como um precursor que tem potencial de formação de material particulado secundário. Quando integrada pelo tempo, essa massa emitida representa a quantidade de poluente presente no ar. Uma parte é então inalada pela população (massa inalada). Estes três fluxos compõem a fração de inalação. Este fator será o componente a ser considerado na análise dos modelos de caracterização no presente trabalho e, portanto, está em destaque na Figura 1.

A quantidade que foi inalada pela população acarretará certa incidência de doenças, que por sua vez, irão causar impactos na saúde humana. Esta combinação é denominada fator de efeito (FE). O fator de caracterização (FC) é dado então pela multiplicação do fator de inalação pelo fator de efeito, conforme a Equação (2).

$$FC = iF \times EF \quad (2)$$

O FC é dado, geralmente, em Anos de Vida Perdidos por Incapacidade (do inglês *Disability Adjusted Life Years* - DALY) por kg de material particulado ou do precursor emitido.

Devido à complexidade no cálculo do iF e do EF, e por existirem modelos que calculam somente um deles, decidiu-se separar a análise dos modelos de caracterização entre iF e EF. No presente estudo, o foco será somente nos modelos que calculam iF.

A escolha dos modelos de caracterização a serem avaliados foi baseada no artigo submetido por Giusti *et al.* (2020 – no prelo), que efetuou uma seleção prévia dos modelos, baseando-se principalmente nos modelos de caracterização recomendados pelo *Life Cycle Assessment (LCA) Compendium* e que consideram a categoria de impacto de material particulado. Neste trabalho, serão analisados e pontuados cinco modelos. A Tabela 1 contém a lista desses modelos de AICV para a categoria de impacto de MP, bem como os métodos de AICV em que estão inseridos.

Tabela 1: Lista de Modelos AICV para a Categoria de Material Particulado

Modelo	Método AICV
Van Zelm <i>et al.</i> (2008)	ReCiPe
Bare (2011)	TRACI 2.0
Humbert <i>et al.</i> (2011)	Impact World (iF)
UNEP e SETAC (2016)	-
Van Zelm <i>et al.</i> (2016)	ReCiPe 2016 e LC-Impact

Fonte: Adaptado de Giusti *et al.* (2020)

Para avaliar os modelos AICV, foi seguida a estrutura proposta pela RAICV (2019), destacando que os três critérios utilizados foram: Escopo, Robustez Científica e a existência de um Fator de Caracterização para o Brasil. Além disso, para cada um desses critérios foram utilizados sub-critérios para a análise. Os critérios e subcritérios a serem utilizados neste trabalho foram:

**CRITÉRIO 1 – ESCOPO:** Este critério avalia a qualidade do escopo do modelo de caracterização e julga se os resultados apresentados são coerentes. Os subcritérios utilizados para realizar tal avaliação são:

1.1. *Abrangência do escopo de aplicação:* global, continental, nacional ou regional.

1.1.1. *Nível de diferenciação espacial geográfico:* Qual a resolução (km × km) utilizada no modelo de transporte de poluente.

1.1.2. *Nível de diferenciação espacial por arquétipo:* Quais ambientes são considerados na dispersão do material particulado? Rural, urbano ou remoto?

1.1.3. *Resolução temporal:* no transporte e dispersão dos poluentes.

1.1.4. *Nível de fluxos elementares considerados:* Quantas substâncias foram consideradas no modelo? Ressaltando que é essencial considerar no modelo pelo menos o material particulado primário (MP<sub>2,5</sub> ou MP<sub>10</sub>).

**CRITÉRIO 2 – ROBUSTEZ CIENTÍFICA:** Este critério verifica a transparência e clareza dos dados utilizados nos cálculos de cada modelo de caracterização. Além disso, verifica se estes são de fácil acesso. Para isso foram considerados os subcritérios:

2.1. *Faz parte de algum método de AICV ou é reconhecido pela comunidade científica?* Este critério possui como objetivo identificar se o modelo em análise é ou não reconhecido pela comunidade científica, como também analisa se o modelo faz parte de algum método de AICV.

2.1.2. *Apresenta cadeia de causa e efeito?* Ssim ou não.

2.2. *Transparência e acessibilidade:* As equações presentes no modelo de transporte químico e os dados utilizados são de fácil acesso e estão claros? A classificação abrange os níveis alto, moderado ou baixo. Este subcritério é dividido nos dois seguintes:

2.2.1. *Clareza das equações do modelo de caracterização:* as equações são apresentadas no modelo?

2.2.2. *Clareza das variáveis:* os valores e as variáveis utilizadas no cálculo foram disponibilizados no modelo?

**CRITÉRIO 3 – FRAÇÃO DE INALAÇÃO:** neste critério são avaliados somente os modelos que apresentam uma fração de inalação específica para o Brasil, analisando-se se esses fatores estão condizentes com a realidade nacional.

3.1. *Possui fração de inalação para o Brasil?:* sim ou não.

3.1.1. *Nível de diferenciação espacial geográfico*: Qual a resolução (km × km) utilizada para o cálculo do fator de caracterização do Brasil.

3.1.2. *Nível de diferenciação espacial por arquétipos*: Quais ambientes são considerados na dispersão do material particulado? Rural, urbano ou remoto? Para o FC do Brasil.

3.1.3. *iF apropriado para o contexto nacional*: o modelo é coerente com a formação de material particulado no Brasil? Considera a diversidade geográfica e climática individual de cada região do território brasileiro?

De acordo com a recomendação da RAICV, cada sub-critério pode ser pontuado de 1 (menos recomendado) a 5 (mais recomendado). Além disso, todos os sub-critérios terão a mesma importância (mesma distribuição de pontos) nas avaliações dos cinco modelos previamente adaptados. Todavia uma alteração com relação às atribuições das pontuações foi feita e a nota zero será utilizada para os casos em que o modelo não atenda o sub-critério avaliado. A Tabela 2 contemplará o quão completo é o modelo avaliado em relação ao Critério “Escopo” para iF.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a categoria de material particulado podem ser encontrados na literatura modelos com abordagem geográfica ou por arquétipos e, não há um consenso científico sobre qual abordagem é a mais recomendada e determinante para a formação do FC.

Além disso, também há autores que sugerem uma abordagem híbrida, afirmando que a combinação de arquétipos e dados regionais específicos são a melhor alternativa. A Tabela 2 divide os modelos em abordagem geográfica e arquétipo.

Tabela 2: Classificação dos modelos quanto às abordagens geográfica, por arquétipo e híbrida

### Abordagem Geográfica

Van Zelm *et al.* (2008)

Bare (2011)

Van Zelm *et al.* (2016)

### Abordagem por Arquétipo

UNEP e SETAC (2016)

Humbert *et al.* (2011)

Fonte: Adaptado e traduzido de Giusti *et al.* (2020)

Os cinco modelos da Tabela 2 foram analisados e pontuados de acordo com cada uma das tabelas de avaliações dos critérios. Na tabela 3, constam as pontuações finais da avaliação dos três critérios para o iF.

Tabela 3: Pontuação da avaliação dos três critérios para o iF

Modelo	Escopo	Robustez Científica	iF para o Brasil	Pontuação Final
<b>Abordagem geográfica</b>				
Van Zelm <i>et al.</i> (2008)	3,75	5,00	1,00	3,25
Bare (2011)	2,75	3,40	1,00	2,38
Van Zelm <i>et al.</i> (2016)	3,75	4,80	3,00	<b>3,85</b>
<b>Abordagem por arquétipo</b>				
Humbert <i>et al.</i> (2011)	3,75	4,60	1,00	3,12
UNEP e SETAC (2016)	4,50	2,40	4,33	<b>3,74</b>

Fonte: Adaptado e traduzido de Giusti *et al.* (2020)

Analisando as pontuações obtidas, o modelo mais recomendado para o iF levando em consideração a abordagem geográfica é o de Van Zelm *et al.* (2016), com uma pontuação de 3,85. Já com relação à abordagem por arquétipo, o modelo mais recomendado é o UNEP e SETAC (2016) com a pontuação de 3,74.

Com relação às pontuações de cada critério para os modelos de mais alta pontuação, Van Zelm *et al.* (2016) apresenta uma pontuação elevada no critério de Robustez Científica. Já o modelo UNEP e SETAC (2016) apresentou uma pontuação elevada tanto para o critério de Escopo quanto para o de iF, entretanto o modelo não apresenta clareza com relação às equações e variáveis do modelo.

## CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos no decorrer do estudo proposto pelo presente trabalho, as análises convergem para a recomendação do modelo de Van Zelm *et al.* (2016) para a abordagem geográfica e o modelo de UNEP e SETAC (2016) para a abordagem por arquétipos.

Ademais, nota-se que ainda são necessárias as análises e avaliações de outros modelos disponíveis, já que apenas cinco modelos foram avaliados. Além disso, é importante destacar que os resultados obtidos podem apresentar alguma divergência, já que a avaliação é qualitativa.

Portanto, pesquisas na área de formação de MP são fundamentais e relevantes para que haja uma recomendação e posteriormente regionalização desses modelos, possibilitando a adequação do modelo para o contexto brasileiro.

## REFERÊNCIAS

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

BARE, J. C. TRACI 2.0: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. *Clean Techn. Environ. Policy*, [s. l.], v. 13, p. 687-696, 2011.

EC-JRC - European Commission Joint Research Centre. Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context: based on existing environmental impact assessment models and factors. ILCD HANDBOOK - INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM. European Union, 2011.

GIUSTI, G.; TADANO, Y.S.; VIEIRA, J.G.V.; SILVA, D.A.L. Particulate matter formation in life cycle impact assessment: Critical review of existing models and recommendations for Brazil. ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT REVIEW (no prelo).

HAUSCHILD, M. Z.; HUIJBREGTS, J. Life Cycle Impact Assessment. *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment*, 2015.

HUMBERT, S. *et al.* Intake Fraction for Particulate Matter: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment. *Environmental Science & Technology*, v. 45, n. 11, p. 4808-4816, 2011.

JOLLIET, O. *et al.* IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *Life Cycle Impact Assessment Programme of the Life Cycle Initiative*. 2003.

REDE DE PESQUISA EM AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (RAICV). O que é a RAICV? 2019. Disponível em: <http://raicvbrasil.wixsite.com/raicv>. Acesso em: 20 agosto 2020.

REDE DE PESQUISA EM AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA - RAICV. Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro. 1. ed. Brasília: IBICT, 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME (UNEP); SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC). Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators. 1. ed. [s.l.], 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). Particulate matter emissions. 2019. Disponível em: [https://cfpub.epa.gov/roe/indicator\\_pdf.cfm?i=19](https://cfpub.epa.gov/roe/indicator_pdf.cfm?i=19). Acesso em 20 agosto 2020.

VAN ZELM, R. *et al.* European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment, *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*. Oxford, v. 42, n. 3, p. 441-453, 2008.

VAN ZELM, R. *et al.* Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: Damage to human health and vegetation. *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*, Oxford, v. 134, p. 129-137, 2016.