

Pegada de Carbono: Em busca de definição e método para uma Logística Verde

Carbon Footprint: In search of a definition and method for Green Logistics

Mateus Santana¹, Universidade Estadual de Maringá, Depto. Engenharia de Produção

Olivia Toshie Oiko², Universidade Estadual de Maringá, Depto. Engenharia de Produção

RESUMO

A Pegada de Carbono é um conceito que vem sendo utilizado para mensuração de impactos relacionados a mudanças climáticas e que, quando utilizado para atividades logísticas, pode contribuir para a Logística Verde. Apesar da ampla utilização, não há consenso quanto a sua definição e métodos de cálculo. Este trabalho levantou, por meio de uma revisão sistemática da literatura, definições e métodos existentes para o cálculo de Pegada de Carbono aplicados a atividades de transporte. As definições mais frequentes foram comparadas quanto ao seu escopo de aplicação, gases considerados e métodos sugeridos - tópicos em que foram observadas divergências. Já os métodos mais recorrentes também foram comparados quanto ao escopo, gases, etapas de desenvolvimento e abordagens de cálculo. Ao término, observou-se que apesar da aparente diversidade de opções, todos os métodos são compatíveis com a maioria das definições e possuem a mesma equação base de cálculo, ou podem partir desta.

Palavras-chave: Emissões de GEEs. Impactos Ambientais. Mudanças Climáticas. Pegada de Carbono. Logística de Transporte.

Editor Responsável: Prof.
Dr. Hermes Moretti Ribeiro da
Silva

ABSTRACT

The Carbon Footprint is a concept used to estimate climate change-related impacts. When applied to logistic's activities, this concept can contribute to Green Logistics. Despite its widespread use, there is no consensus on its definition or methods for calculation. This paper reports on a systematic literature review which identified Carbon Footprint definitions and calculation methods applied to transportation activities. The most recurrent definitions were compared as to their scope, and included gases and suggested methods. The most recurrent methods were also compared in terms of their scope, gases, steps and calculation approaches. Despite the assumed diversity of options, all methods are compatible with most definitions. Also, the methods have the same basic equation which can be used.

Keywords: GHG Emissions. Environmental Impacts. Climate Changes. Carbon Footprint. Transportation Logistics.

1. Av. Colombo, 6780, Bloco 19/20, Jardim Universitário, Maringá, Paraná; mateus.95.santana@gmail.com; 2. otoiko@uem.br

SANTANA, M.; OIKO, O.T. Pegada de Carbono: Em busca de definição e método para uma Logística Verde. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 14, n. 4, p. 197 - 214, 2019.

DOI: 10.15675/gepros.v14i4.2334

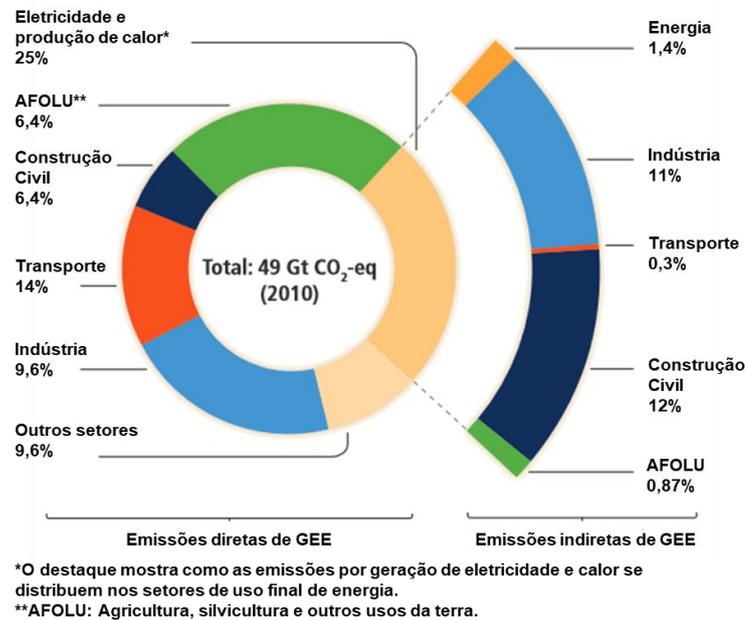
1. INTRODUÇÃO

A Logística Verde é a parte da Logística que se preocupa com os aspectos e impactos ambientais causados por suas operações como transporte, armazenamento e manejo de produtos. Dentre os estudos compreendidos por essa ciência, encontra-se a mensuração e análise dos danos ao meio ambiente gerados por tais atividades, como a emissão de poluentes atmosféricos, que possui grande relevância devido ao seu alto grau de impacto ambiental negativo (DONATO, 2008).

Nos últimos anos, houve um aumento no número de trabalhos publicados na área, em especial a partir de 2011, evidenciando maior interesse e preocupação com o tema por parte da academia (SANTOS *et al.*, 2015), com aplicações de técnicas e ferramentas para a redução dos impactos ambientais resultantes dessas operações.

Do ponto de vista ambiental, a operação de transporte é a que merece maior destaque dentro da cadeia de suprimentos por ser a maior emissora de gases poluentes, como CO₂, NO_x e SO₂, bem como de material particulado (ROMMERT; JACQUELINE; IOANNIS, 2012). Além disso, segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), as emissões antropogênicas de gases do efeito estufa (GEEs) no mundo aumentaram em 10 GtCO_{2eq} de 2000 para 2010, sendo o setor de transportes responsável por 11% desse aumento, bem como por 14% das emissões antropogênicas totais de GEEs ocorridas em 2010, conforme ilustrado na Figura 1 (IPCC, 2014).

Figura 1 - Emissões totais de CO₂ por setor econômico em 2010



(Fonte: IPCC, 2014, p. 47).

Nesse contexto, torna-se necessária a utilização de indicadores de desempenho que mensurem quão impactantes tais atividades estão sendo para o meio ambiente. Um desses indicadores presentes na literatura é a Pegada de Carbono, ou *Carbon Footprint* (CFP). A CFP é um conceito que vem sendo utilizado como ferramenta para mensuração de impactos relacionados a mudanças climáticas (WIEDMAN; MINX, 2008) e sua aplicação pode ser particularizada às operações logísticas, possibilitando a formulação de planos de ação para minoração dos danos ambientais dessas operações, ou seja, para uma Logística Verde.

Apesar da ampla utilização, não há consenso quanto à sua definição (WIEDMAN; MINX, 2008). Por outro lado, diversos autores já perceberam a problemática e desenvolveram estudos acerca do tema: Barnett *et al.* (2012) descrevem diversos métodos de mensuração e problemas consequentes das discordâncias destes de forma qualitativa; Pandey, Agrawal e Pandey (2011) mensuram a CFP de diversos produtos utilizando dois métodos e, além de realizar uma comparação direta dos resultados numéricos, buscam descobrir se há correlação entre eles; Rugani *et al.* (2013) fazem uma revisão crítica da literatura a fim de analisar as vantagens e restrições de se usar a CFP como indicador ambiental no setor vinícola, considerando, dentre outras variáveis, as diferenças entre os métodos existentes; Navarro, Puig e Fullana-I-Palmer (2017) também voltam seus estudos para o setor de vinhos, porém

confrontando os métodos de forma aprofundada especificamente quanto ao escopo de mensuração e suas implicações na mensuração de CFP dessa atividade. Contudo, mesmo com diversos estudos explicitando as divergências entre os métodos e suas consequências, ainda é frequente encontrar trabalhos que mensuram CFP sem explicitar a definição e o método utilizados, conforme será apresentado e discutido na seção 3.

Assim, o presente trabalho objetivou levantar um conjunto robusto de conceitos e métodos existentes para CFP aplicados à operação de transporte. Para isso, foram comparados definições e métodos encontrados na literatura a partir de uma revisão sistematizada. Com isso, espera-se auxiliar na escolha de métodos para utilização da CFP como indicador de desempenho ambiental na Logística de Transporte.

Na próxima seção são descritas as etapas de criação e aplicação do protocolo da revisão sistemática. Na seção 3, as definições e métodos mais recorrentes são descritos e suas semelhanças e divergências são discutidas; por fim, na seção 4, é apresentada a conclusão.

2. MÉTODO DE PESQUISA

O procedimento metodológico utilizado neste trabalho foi a Revisão Sistemática, que, segundo Sampaio e Mancine (2007, p. 84):

[...] assim como outros tipos de estudo de revisão, é uma forma de pesquisa que utiliza como fonte de dados a literatura sobre determinado tema. Esse tipo de investigação disponibiliza um resumo das evidências relacionadas a uma estratégia de intervenção específica, mediante a aplicação de métodos explícitos e sistematizados de busca, apreciação crítica e síntese da informação selecionada. As revisões sistemáticas são particularmente úteis para integrar as informações de um conjunto de estudos realizados separadamente [...].

A fim de alcançar os objetivos propostos para este estudo, as seguintes etapas foram realizadas, tendo por base o modelo desenvolvido por Biolchini *et al.* (2005):

1. Planejamento da Revisão: Definir os objetivos e o protocolo da pesquisa;
2. Avaliação do Planejamento: Validar protocolo em fontes menores;
3. Execução da Revisão: executar o protocolo e selecionar estudos relevantes;
4. Avaliação da Execução: Verificar se os mecanismos de pesquisa das fontes selecionadas permitiram executar o protocolo como planejado.
5. Análise dos Resultados: Resumir os resultados e analisá-los conforme definido na fase 1.

A seguir, as etapas 1 e 2 são detalhadas. O desenvolvimento das etapas 3, 4 e 5 encontra-se na seção 3.

A busca da palavra-chave “*Carbon Footprint*” na plataforma Web of Science em outubro de 2017 retornou 5880 resultados, enquanto para a palavra-chave “Pegada de Carbono” não houve resultados. Como o objetivo era encontrar definições do termo CFP, tentou-se adicionar palavras-chave como “*definition*” à *string*, mas a presença desta ou de outras palavras-chaves não garantia que houvesse uma definição do termo CFP, pois a definição poderia ser apresentada sem a palavra “*definition*”. Por isso, foi estabelecido o “Procedimento para classificação do estudo”, para a identificação das definições e métodos, conforme pode ser observado no Quadro 1.

Em seguida, foram adicionadas à *string* as palavras “*Fleet*” e “*Freight*” para alcançar trabalhos aplicados às atividades de transporte. Em todas as pesquisas, selecionou-se como local de busca da palavra-chave a opção “Tópico”. A *string* final retorna trabalhos que combinam o termo “*carbon footprint*” e “*fleet*” e também os trabalhos que combinam “*carbon footprint*” e “*freight*”.

Quadro 1 - Protocolo da pesquisa

Pergunta de Pesquisa	
	Foco da Questão: Encontrar definições e métodos de cálculo mais frequentes de Pegada de Carbono aplicadas a operações de transporte e identificar diferenças e semelhanças.
	Problema: A CFP é um indicador de impacto ambiental utilizado amplamente na literatura, porém sua definição e métodos de mensuração ainda não estão definidos, podendo resultar em valores diferentes de CFP ao se utilizar diferentes métodos para uma mesma situação analisada.
	Pergunta: Quais as definições e métodos de mensuração de Pegada de Carbono aplicada à atividade de transporte mais utilizados na literatura e suas diferenças?
	Palavras-chave e Termos de Busca*: (TS=("Carbon footprint" AND fleet)) OR (TS=("Carbon footprint" AND freight))
	Anos de publicação: Entre 1945 e 2017.
Seleção das Fontes	
	Seleção da Fonte: Web of Science - WoS (amplitude de resultados e acesso aos trabalhos) e Google Scholar (apenas para localizar textos completos dos trabalhos já identificados na WoS).
Seleção dos Estudos	
	Critérios de Exclusão de Estudos: Não possuir aplicação de CFP a operações de transporte. Não ser possível acessar o texto completo nas bases consultadas.
	Informações a serem coletadas (Critério de Classificação): Definições de CFP; Métodos de mensuração de CFP;
	Procedimento para classificação do estudo: 1. Aplicar <i>string</i> especificada nos mecanismos de busca da base WoS; 2. Para cada texto, verificar se há aplicação de CFP a operações de transporte; 2.1. Se sim, ir para passo 3; 2.2. Se não, excluí-lo da revisão;

GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, v. 14, nº 4, p. 197 - 214, 2019.

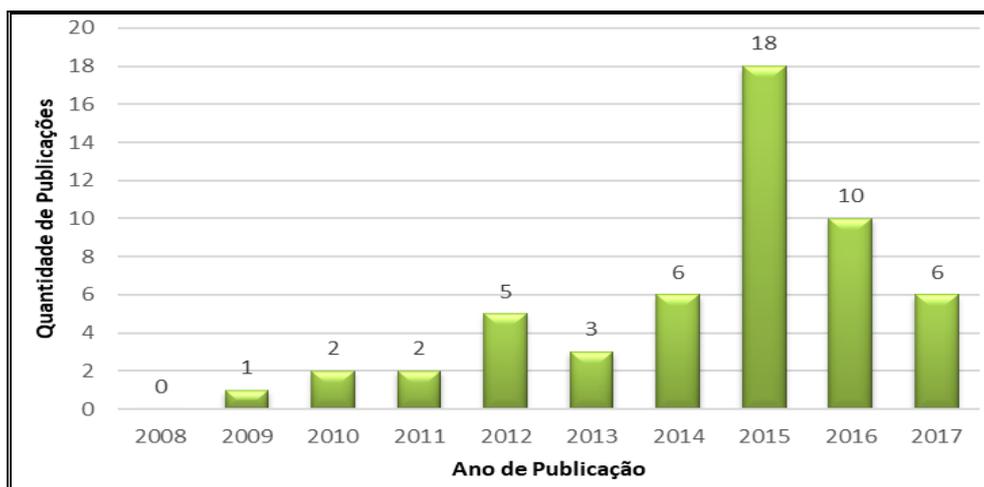
3. Verificar se é possível acessar sua versão integral na plataforma WoS;
 - 3.1. Se não for possível, ir para passo 4;
 - 3.2. Se for possível, ir para passo 6;
 4. Buscar pelo título do texto na plataforma Google Scholar;
 5. Verificar se é possível acessar sua versão integral na plataforma Google Scholar;
 - 5.1. Se sim, ir para passo 6;
 - 5.2. Se não, excluí-lo da revisão.
 6. Buscar pelos termos “Carbon Footprint” e “CFP” dentro dos trabalhos a partir da função “localizar” no software de leitura de arquivos .pdf;
 7. Localizar definições e/ou referências para definições do termo CFP;
 8. Localizar métodos e/ou referências para métodos de mensuração da CFP;
 9. Repetir o procedimento a partir do passo 2 para todos os textos localizados.
- *TS: Código utilizado pela plataforma Web of Science para indicar que as palavras-chave serão buscadas no Tópico dos trabalhos.

Fonte: Autoria própria (2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A busca a partir da *string* retornou 84 trabalhos que relacionam a Pegada de Carbono com “*fleet*” ou com “*freight*”. Destes, 31 trabalhos (37%) foram descartados pela falta de acesso ao trabalho completo. A Figura 2 ilustra a distribuição ao longo dos anos dos 53 trabalhos completos encontrados. Observa-se um padrão de crescimento no número de trabalhos ao longo do período, com um pico em 2015.

Figura 2 - Distribuição das publicações por ano



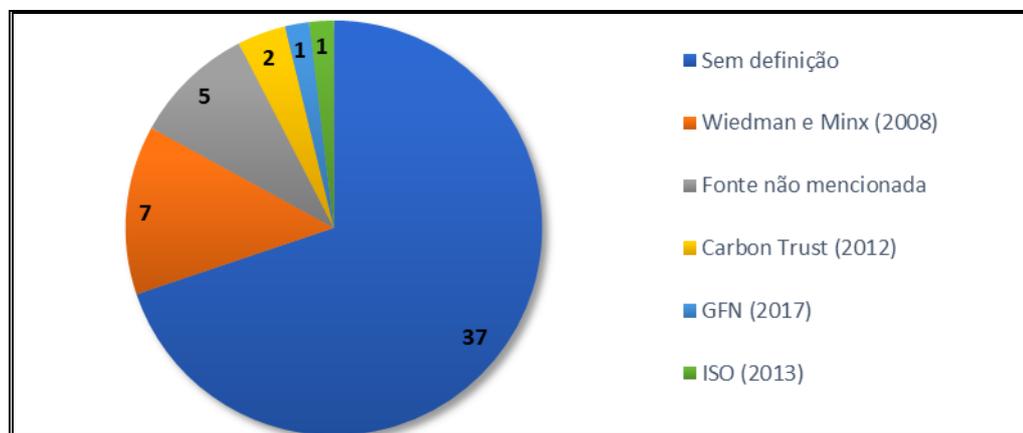
Fonte: Autoria própria (2018).

Em seguida, os textos completos foram analisados em busca de definições e classificados (Figura 3). Em 37 trabalhos (69,8%), não foi encontrada a definição do termo “*Carbon Footprint*”. Nos trabalhos em que a definição foi encontrada, a definição mais citada

foi a de Wiedman e Minx (2008) (13,2%), seguida por Carbon Trust (2012) (3,8%); International Organization of Standardization (ISO, 2013) e Global Footprint Network – GFN (2017) (ambas com 1,9%). Em 5 trabalhos, foi apresentada uma definição cuja origem não foi mencionada, porém observou-se que um deles utiliza-a como sinônimo para “emissões de CO₂” e os 4 restantes para “emissões de GEEs”.

O próximo passo foi localizar os trabalhos citados e analisar as definições. Wiedman e Minx (2008) analisam diversas definições existentes até a publicação de seu trabalho e definem a Pegada de Carbono como “uma medida do montante total e exclusivo de CO₂ que é gerado direta e indiretamente por uma atividade ou que é acumulado durante os estágios de vida de um produto”. Portanto, eles não consideram outros gases. Quanto aos métodos de cálculo, eles sugerem duas abordagens com o objetivo de realizar uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) completa: o “*Process Analysis*” (abordagem *bottom-up*) e a “*Environmental input-output*” (abordagem *top-down*).

Figura 3 - Quantificação das definições utilizadas nos artigos



Fonte: Autoria própria (2018).

A Carbon Trust é uma empresa sem fins lucrativos com a missão de acelerar o movimento para uma economia baseada na mínima emissão de carbono, oferecendo suporte técnico para isso (CARBON TRUST, 2012). Em seu guia, a CFP é definida como “a emissão total de GEEs causada direta ou indiretamente por um indivíduo, organização, evento ou produto”.

A entidade divide a CFP em dois tipos: a CFP organizacional, que mensura as emissões de GEEs de todas as atividades ao longo da organização, incluindo a energia

utilizada nas instalações, processos industriais e veículos da empresa e a CFP do produto, que mensura as emissões de GEEs durante toda a vida do bem ou serviço. Para a mensuração da CFP organizacional, a metodologia recomendada é a descrita no *Greenhouse Gas - GHG Protocol*, do World Resource Institute (WRI, 2008). Para a CFP de produto, recomenda-se a metodologia da norma PAS 2050:2011 do The British Standard Institution (BSI, 2011).

A ISO 14067 (ISO, 2013) detalha princípios, requisitos e diretrizes para a quantificação e comunicação da CFP total e parcial de um produto. A CFP total compreende as emissões e sequestros de GEEs durante o ciclo de vida de um produto, com base na categoria de impacto de mudanças climática de sua ACV. A CFP parcial se refere a um ou mais processos selecionados do sistema de um produto.

A norma não recomenda nenhum método de cálculo em particular, mas sim define diretrizes e normas que devem ser seguidas para se realizar o cálculo e para documentar os resultados: de acordo com a norma, um estudo de CFP deve incluir as quatro fases da ACV: definição do objetivo e do escopo, inventário de ciclo de vida, avaliação do impacto do ciclo de vida e interpretação do ciclo de vida, bem como a explicação detalhada de cada um desses itens.

A GFN é uma organização sem fins lucrativos fundada em 2003 que desenvolve e promove estudos e ferramentas que contribuem para o desenvolvimento sustentável, sendo reconhecida internacionalmente por diversos prêmios. Ela utiliza a Pegada Ecológica (*Ecological Footprint - EFP*) como indicador para mensurar impactos ambientais, sendo a CFP uma componente desta (GFN, 2017). A metodologia de cálculo de EFP foi publicada pela organização em Borucke *et al.* (2012), no qual a CFP é definida como um indicador que “converte a quantidade de emissões antropogênicas de CO₂ na quantidade de área produtiva terrestre e marítima necessária para sequestrar tais emissões”.

A unidade de mensuração da CFP também varia de acordo com o método: em Wiedman e Minx (2008), Carbon Trust (2012) e ISO (2013), utiliza-se unidades de massa de CO₂ (toneladas de CO₂); já em Borucke *et al.* (2012), a CFP é dada em unidades de área (hectares). Porém, quando são incluídos outros GEEs no caso da Carbon Trust (2012) e ISO (2013), é necessário converter (normalizar) o resultado final para dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq), multiplicando as emissões de cada GEEs por seu valor de *Global Warming Potential (GWP)*. Este é um fator que compara o potencial de cada gás em contribuir para o aquecimento em relação ao CO₂, e foi divulgado no quarto relatório

GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, v. 14, n° 4, p. 197 - 214, 2019.

publicado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007). O Quadro 2 traz um resumo das principais diferenças entre as definições.

Quadro 2 - Comparação das definições de CFP encontradas nos artigos analisados

Fonte da definição	Aplicação	Gases	Unidade	Método
Carbon Trust (2012)	Atividades ao longo de uma organização	GEEs definidos no Protocolo de Kyoto*	Ton CO ₂ -eq	GHG Protocol (WRI, 2008)
	Ciclo de vida de um produto			PAS 2050: 2011 (BSI, 2011)
ISO 14067 (ISO, 2013)	Ciclo de vida de um produto	Todos os GEEs listados no Anexo A da ISO 14067:2013*	Ton CO ₂ -eq	Não especificado (ACV)
	Processo ou atividade específico			Não especificado (ACV)
Wiedman e Minx (2008)		CO ₂	Ton CO ₂	<i>Process Analysis (bottom-up) e Environmental input-output (top-down)</i>
GFN (Borucke <i>et al.</i> , 2012)	Atividade, indivíduo ou população	CO ₂	Ha	Borucke <i>et al.</i> (2012)

* Nas atividades de transporte, os GEEs aplicáveis são CO₂, CH₄ e N₂O

Fonte: Autoria própria (2018).

Já em relação aos métodos de cálculo, há uma variedade muito maior de fontes citadas nos artigos analisados, conforme ilustra o Quadro 3.

Quadro 3 - Quantificação dos métodos citados nos trabalhos

Método	Ocorrências	% em relação ao total
IPCC (2006)	16	25,0%
Método não acessível	13	20,3%
ACV (ISO, 2006)	7	10,9%
GHG Protocol (WRI, 2008) (adaptado)	7	10,9%
Association Bilan Carbone (ABC, 2004)	3	4,7%
PAS 2050 (BSI, 2011)	3	3,1%
Bektaş e Laporte (2011)	2	4,7%
GREET® Model (ANL*, 2014)	2	3,1%
Network for Transport Measures (NTM, 2015)	2	3,1%
*ANL: Argonne National Laboratory		
**EC: European Commission		

Fonte: Autoria própria (2018).

Embora tenham sido identificados 16 métodos, foram analisados os três mais utilizados pelos autores dos artigos por representarem 56,3 % das ocorrências, sendo eles: IPCC (2006); ACV, descrito na norma ISO 14040:2006 (ISO, 2006); e o GHG Protocol

(WRI, 2008). Convém ressaltar que em 13 trabalhos não foi possível identificar o método utilizado pois a fonte deste não era citada no estudo ou não era possível acessar seu texto integral por meio das plataformas de busca Web of Science ou Google Scholar.

O IPCC foi fundado em 1988 no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU) para fornecer aos líderes políticos avaliações periódicas das bases científicas das mudanças climáticas, seus impactos e riscos futuros, e opções em forma de adaptações e mitigações (IPCC, 2013). Em 2006, a organização publicou um guia fornecendo metodologias para estimar inventários nacionais de emissões antropogênicas e sequestros de GEEs (IPCC, 2006).

A ACV é um método utilizado para avaliar o impacto ambiental de bens e serviços. A avaliação do ciclo de vida de um produto, processo ou atividade é uma avaliação sistemática que quantifica os fluxos de energia e de materiais no ciclo de vida do produto (ALMEIDA; GIANETTI, 2006). As etapas para realizá-la são descritas na norma ISO 14040 (ISO, 2006).

O WRI é uma organização global de pesquisa fundada em 1982 que abrange mais de 50 países, atuando no Brasil desde 2006. Seus membros trabalham junto a líderes de empresas e organizações para transformar ideias em ações por meio de grandes projetos com o objetivo de garantir qualidade de vida e um ambiente saudável para a atual e as futuras gerações (WRI, 2018). Em 1998, o WRI lançou o GHG Protocol, ferramenta utilizada por diversas instituições privadas e governamentais para quantificar e estudar suas emissões de poluentes, sendo utilizada no Brasil de forma adaptada desde 2008. As instruções detalhadas para sua utilização encontram-se em WRI (2008).

Embora os três métodos possuam etapas próprias de realização, para fins de comparação eles foram subdivididos em 4 macro fases. A descrição das fases e a comparação entre elas encontram-se no Quadro 4.

Quadro 4 - Comparação entre os métodos de mensuração de CFP

Objetivo: Quantificar a Pegada de Carbono das operações de transporte de determinada empresa		
IPCC (2006)	ACV (2006)	GHG Protocol (WRI, 2008)
<p>Fase 1: Definição do escopo. Os três métodos orientam delimitar o escopo de aplicação, ou seja, quais processos serão mensurados, pois podem ser aplicados tanto em escopos abrangentes, como sistemas produtivos complexos, países e empresas, quanto em atividades específicas destes. Cada método possui diferentes formas de particularizar seus escopos.</p>		
<p>Após identificar as atividades que serão mensuradas, deve-se verificar em qual dos Setores, Categorias e Subcategorias listadas pelo IPCC cada atividade se enquadra. No caso da operação de transporte rodoviário, por exemplo, a mesma é classificada no setor Energia, categoria Transporte e subcategoria Carros.</p>	<p>A primeira etapa de uma ACV é a Definição do Objetivo e Escopo. Após determinar o objetivo da ACV e a unidade funcional de estudo (unidade na qual as entradas e saídas vão ser relacionadas), deve-se definir os processos a serem incluídos no sistema, os quais, idealmente, possuam apenas entradas e saídas elementares, ou seja, matéria ou energia sem alterações humanas.</p>	<p>São definidos os limites da empresa, que podem ser: geográficos (país em que as emissões de GEEs ocorreram); organizacionais (estrutura contábil da empresa) e operacionais (operações que serão mensuradas). Também se subdividem em diretas (fontes pertencentes ou controladas pela empresa), indiretas (produção de energia elétrica e térmica) e outras (fontes não pertencentes à empresa).</p>
<p>Fase 2: Definição da abordagem de cálculo das emissões. Cada método orienta utilizar diferentes abordagens para mensurar as emissões de GEEs das atividades consideradas no escopo.</p>		
<p>O método tem por base a equação: <i>Emissões = Atividade • Fator de Emissão</i> No capítulo 3 do volume 2, o IPCC explica como adaptar a equação para mensurar as emissões de CO₂ por percurso do veículo, CO₂ por catalisadores de ureia, NO₂ e CH₄. O método propõe Tiers (“níveis”), com diferentes níveis de detalhamento, alterando ou incluindo variáveis.</p>	<p>A quantificação das emissões em uma ACV ocorre durante a etapa de realização do Inventário, na qual as emissões que ocorrem durante os processos e os montantes de energia e matéria-prima utilizados são quantificados. Contudo, a norma não define o método de cálculo que deve ser utilizado.</p>	<p>O WRI detalha duas abordagens de quantificação de GEEs: Mensuração Direta e Cálculo. A mensuração direta consiste em monitorar a concentração dos GEEs emitidos no processo utilizando equipamentos específicos. Já por meio do Cálculo, a mesma equação do IPCC é seguida, porém com adaptações.</p>
<p>Fase 3: Realização dos cálculos. Definida a abordagem e coletados os dados, os cálculos são realizados. Uma vez que o escopo pode abranger sistemas complexos, existem diversas calculadoras para facilitá-los.</p>		
<p>O IPCC detalha cada equação e disponibiliza os fatores de emissão para que se possa realizar os cálculos manualmente ou por meio de uma planilha eletrônica. O painel também desenvolveu um <i>software</i> gratuito que pode ser encontrado em seu <i>site</i>.</p>	<p>A norma não disponibiliza nem sugere <i>softwares</i> ou planilhas para efetuar os cálculos. É possível encontrar na literatura e na <i>internet</i> uma variedade de ferramentas para se conduzir uma ACV ou alguma etapa específica desta algumas já adaptadas para setores específicos da indústria, porém poucas são gratuitas (Lehtinen <i>et al.</i>, 2011)</p>	<p>Segundo o protocolo, as empresas podem usar seus próprios métodos de cálculo de GEEs, desde que sejam mais precisos ou consistentes com as diretrizes do Programa Brasileiro GHG Protocol. Contudo, uma planilha é disponibilizada gratuitamente em seu site como ferramenta para os cálculos (WRI, 2008).</p>
<p>Fase 4: Apresentação dos resultados. Após os cálculos, os resultados devem ser apresentados</p>		

GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, v. 14, n° 4, p. 197 - 214, 2019.

seguindo padrões próprios de cada método.		
As diretrizes para relatar as emissões e as tabelas que devem ser utilizadas para dispor os valores numéricos são descritas no capítulo 8 do volume 1 do guia.	A norma não estabelece um formato para a disposição das emissões, mas determina que sejam ressaltados os dados, métodos e pressupostos do estudo, e as limitações associadas, conforme item 6 da norma.	O protocolo não determina um modelo de inventário a ser seguido, mas no capítulo 7 há instruções para criar o inventário no qual as emissões serão dispostas, como informações obrigatórias e outras diretrizes.

Fonte: Autoria própria (2018).

Comparando os métodos também nos mesmos aspectos que as definições observam-se outras diferenças quanto ao seu escopo, apontadas no Quadro 55.

Quadro 5 - Métodos e suas divergências sob os mesmos aspectos comparativos das definições

Fonte	Aplicação	Gases	Unidade
IPCC (2006)	Empresas, organizações e países*	O volume 2 (combustão móvel) descreve métodos para calcular as emissões de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O e indica o guia para calcular as de CO, NO _x , NMVOCs** e SO ₂ . Todos os gases devem ser reportados no relatório.	Alguns gases em Gg (10 ⁹ g), outros em Ton CO _{2eq}
ACV (2006)	Processos e produtos	Não define qual gás será mensurado, porém, para avaliar o impacto em relação a mudanças climáticas, os gases resultantes devem ser convertidos para CO _{2eq} .	Ton CO _{2eq}
GHG Protocol (WRI, 2008)	Empresas, organizações e países*	GEEs definidos no Protocolo de Kyoto. No caso das atividades de transporte só se aplicam: CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O.	Ton CO _{2eq}

*Podem ser adaptados para escopos menores. ** Compostos orgânicos voláteis não-metano

Fonte: Autoria própria (2018).

Analisando o Quadro 4 e o Quadro 55, verificam-se diversas similaridades entre os métodos nas Fases 1 e 4, as quais, para um mesmo escopo de aplicação, não interferem no valor final da CFP. Contudo, nas Fases 2 e 3, observam-se algumas divergências que podem impactar esse valor, principalmente em termos de refinamento

A primeira diferença ocorre em relação ao detalhamento das etapas de cada método: enquanto na norma para condução da ACV há diretrizes para o estudo, nos outros métodos os passos são mais detalhados. Tal flexibilidade da ACV permite que diferentes ferramentas sejam utilizadas e diferentes GEEs sejam incluídos, podendo resultar em diferentes valores de emissão para um mesmo sistema.

O Quadro 6 - Comparação entre dados de entrada e grau de precisão de cada método

6 ilustra a comparação entre as equações de cada método e os dados de entrada necessários em cada um.

		CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O			CH ₄ , N ₂ O	
Refinamento dos cálculos		←	Equação base	→		
Método	Equação e dados de entrada comuns aos dois métodos	$E = (Dist/Aut)*FE$ Autonomia (Aut) baseada no ano e modelo do veículo; Distância (Dist) percorrida.	$E = Comb*FE$ FE baseado no tipo do combustível .	$E = Comb*FE$ FE baseado no ano e modelo do veículo.		
	IPCC	Nível	Tier 1		Tier 2	Tier 3
	Variáveis exclusivas	Volume e pureza do aditivo de ureia (CO ₂ apenas).	Volume e pureza do aditivo de ureia (CO ₂ apenas).	Volume e pureza do aditivo de ureia (CO ₂); Tecnologia do controle de emissões (CH ₄ e N ₂ O apenas).	Tecnologia do controle de emissões (CH ₄ e N ₂ O). Distância percorrida; Condições de Operações.	
GHG Protocol	Nível	Opção 3	Opção 2	Opção 1		

Quadro 6 - Comparação entre dados de entrada e grau de precisão de cada método

Fonte: Autoria própria (2018).

Como se observa no Quadro 6 - Comparação entre dados de entrada e grau de precisão de cada método

6, a equação base é a mesma para o CO₂, CH₄ e N₂O (Tier 1 e Opção 2), a qual parte da quantidade e do tipo de combustível. Caso não seja possível obter a quantidade de combustível queimada, é possível estimar a partir das distâncias percorridas e da autonomia média de cada veículo, embora com menor precisão (Tier 1 e Opção 3). Por outro lado, também é possível aumentar a precisão dos resultados utilizando FEs mais específicos, sabendo o ano e modelo dos veículos da frota (Tier 2 e Opção 1). O IPCC ainda permite maior refinamento dos cálculos tanto do CO₂, ao incluir as emissões da queima da ureia de catalisadores, quanto do CH₄ e N₂O, ao incluir as variações resultantes das condições de operação e da tecnologia de controle de emissões. Considerando que as emissões por combustão móvel são compostas por cerca de 95% de CO₂ (IPCC, 2006), e que os dados de entrada necessários para o Tier 3 são mais complexos de se conseguirem, a escolha de Tiers menores para estimar as emissões de CH₄ e N₂O torna o processo mais simples e implica em um erro de até 5% das emissões totais de GEEs calculadas.

Considerando que ambos os métodos são igualmente válidos para se mensurar a CFP, o Quadro 5 também ilustra qual método pode ser utilizado conforme a facilidade deste em obter determinado conjunto de dados. Assim, para se mensurar a CFP de determinadas

operações de transporte com a maior precisão oferecida pelos métodos, alguns dados de entrada são necessários para ambos enquanto outros dados só são demandados de acordo com o método selecionado.

4. CONCLUSÃO

Após a revisão da literatura de forma sistemática, foi possível identificar e comparar as definições de CFP e os métodos mais utilizados para mensurá-la quando aplicada a operações de transporte.

As definições e métodos divergem quanto aos seus escopos de aplicação, gases considerados e unidade de medida da CFP. Quanto aos métodos, os três mais recorrentes são bastante similares no geral, apesar de serem identificadas divergências menores em todas as fases.

A fase de definição do escopo é estabelecida nos 3 métodos. Além de quais operações, é necessário definir os gases, sendo os mais comuns para atividades de transporte o CO₂, CH₄ e N₂O. Na fase de cálculo, a equação básica é a mesma, com variações para aumentar o grau de precisão ou para permitir estimativas a partir de outros dados. Na fase de apresentação dos resultados, o IPCC e o GHG Protocol determinam um padrão de como os valores devem ser dispostos, enquanto a ACV sugere apenas diretrizes para tal.

Nos cálculos, observou-se que na ACV não são especificados equação ou software com que a mensuração das emissões deve ser feita, diferentemente do IPCC e do GHG Protocol, que apresentam a mesma equação base. Não importa qual dos dois métodos for escolhido, os parâmetros mínimos para estimar as emissões são a quantidade e tipo de combustível consumido. Os resultados podem ser refinados sabendo-se o ano e modelo de cada veículo da frota. O IPCC ainda permite maior refinamento tanto dos cálculos de CO₂, ao agregar os dados de queima de ureia por catalisadores, quanto dos cálculos de CH₄ e N₂O, ao considerar a tecnologia de controle de emissões e condições de operação. Ainda, ambos métodos permitem estimar as emissões sem ter os dados de consumo de combustível, mas a partir das distâncias percorridas e da autonomia média da frota, embora isso diminua a precisão dos cálculos.

Portanto, as diferenças entre os métodos analisados não são substanciais, uma vez que as etapas são semelhantes e a equação-base é a mesma. Assim, conclui-se que tanto o método do IPCC quanto o do GHG Protocol podem ser utilizados indistintamente para mensuração da Pegada de Carbono da atividade de transporte de uma determinada frota. Contudo, uma vez que o método do IPCC permite maior refinamento dos cálculos de emissões de GEEs e consequente precisão de resultados, este é mais recomendado nos casos em que tal precisão é necessária e possível.

Quando se comparam os métodos mais citados com as definições mais utilizadas, observa-se que a definição do GFN (Borucke *et al.*, 2012), em que a pegada de carbono é expressa em unidade de área, não é atendida por nenhum dos métodos analisados. As demais definições mais citadas podem ser atendidas por todos os métodos analisados. Contudo, a definição mais citada e mais simples, apresentada por Wiedman e Minx (2008) considera apenas o CO₂, não abrangendo os demais GEEs – o que deve ser esclarecido já na fase de definição do escopo.

Como pesquisa futura, sugere-se um aprofundamento da literatura de como a CFP pode ser incorporada à gestão de operações de transporte como ferramenta para redução dos impactos ambientais desta. Também, a fim de ampliar a literatura sobre Logística Verde, sugere-se expandir a análise comparativa realizada neste trabalho a outros componentes da logística tradicional, como a armazenagem e o processamento de pedidos.

Referências

ALMEIDA, C.; GIANNETTI, B. **Ecologia industrial: conceitos, ferramentas e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

ALMEIDA, C.; VAZ, S.; CABRAL, H.; ZIEGLER, F. Environmental assessment of sardine (*Sardina pilchardus*) purse seine fishery in Portugal with LCA methodology including biological impact categories. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 2, p. 297-306, 2014.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **GREET Life-cycle Model**. Center for Transportation Research. Energy Systems Division. 2014. Disponível em: <https://greet.es.anl.gov/publication-greet-model> . Acesso em: 05 fev. 2018.

ASSOCIATION BILAN CARBONE. **Bilan Carbone**. França, 2004. Disponível em: <http://associationbilancarbonate.fr/> . Acesso em: 05 fev. 2018.

BARNETT, A.; BARRACLOUGH, R.; BECERRA, V.; NASUTO, S. **A comparison of methods for calculating the carbon footprint of a product**. Reino Unido, 2012. Disponível em: https://www.reading.ac.uk/web/files/tsbe/Barnett_TSBE_Conference_Paper_2012.pdf . Acesso em: 22 jan. 2018.

BEKTAŞ, T.; LAPORTE, G. The Pollution-Routing Problem, **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, p. 1232-1250, 2011.

BIOLCHINI, J.; MIAN, P.; NATALI, A.; TRAVASSOS, G. Systematic review in software engineering. System Engineering and Computer Science. **Technical Report ES**, v. 679, n. 05, p. 45, 2005.

BORUCKE, M.; MOORE, D.; CRANSTON, G.; GRACEY, K.; IHA, K.; LARSON, J.; LAZARUS, E.; MORALES, J.; WACKERNAGEL, M.; GALLIL, A. Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework. **Ecological Indicators**, v. 24, p. 518-533,

CARBON TRUST. **Carbon footprinting** – The next step to reduce your emissions. Reino Unido, 2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo**. 2015. São Paulo, SP, Secretaria do Meio Ambiente. 2016. Disponível em: http://veicular.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/35/2013/12/Relatorio-Emissoes-Veiculares-2015-v4_.pdf . Acesso em: 23 abr. 2017.

DELUCCHI, M. A Lifecycle Emissions Model (LEM): Lifecycle Emissions from Transportation Fuels, Motor Vehicles, Transportation Modes, Electricity Use, Heating and Cooking Fuels, and Materials. UCD-ITS-RR-03-17, eScholarship Repository, **Universidade da Califórnia**, Berkeley, CA, 2003. Disponível em: <http://repositories.cdlib.org/itsdavis/UCD-ITS-RR-03-17>. Acesso em: 23 abr. 2017.

DONATO, V. **Logística Verde**. Rio de Janeiro: Ed.Ciência Moderna, 2008.

E3M Lab. **PRIMES - REMOVE Transport Model – Detailed Model Description**. Grécia, 2012. Disponível em: <http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/PRIMES%2520Manual/The%2520PRIMES-TREMOVE%2520MODEL%25202013-2014.pdf> . Acesso em: 05 fev. 2018.

ENVIRONMENTAL PROTECT AGENCY, **MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator)**. Estados Unidos, 2015. Disponível em: <https://www.epa.gov/moves> . Acesso em: 05 fev. 2018.

EUROPEAN COMISSION. Regulation (EC) No. 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 Setting Emission Performance Standards for New Passenger Cars as Part of the Community's Integrated Approach to Reduce CO2 Emissions from Light-duty Vehicles. **Official Journal of the European Union**, v. 40, 2009. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0443&from=EM> . Acesso em: 05 fev. 2018.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Climate Change**. 2017. Disponível em: <http://www.footprintnetwork.org/our-work/climate-change/>. Acesso em 4 jul. 2017.

GREATER LONDON AUTHORITY. **Greenhouse Gas Calculator for Municipal Waste User Manual**. Londres, Reino Unido, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 996, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra, Suíça, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC Fact Sheet: Whats is IPCC?**. 2013. Disponível em: http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc.pdf . Acesso em: 01 fev. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **National Greenhouse Gas Inventories Programme**. 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Edited by Simon Eggleston *et al.* Hayama, JP: IGES. v. 2, n. 3. 2006. Disponível em: http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf . Acesso em: 23 abr. 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CO₂ emissions from fuel combustion 2017 – Highlights**. Paris, França. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040:2006**. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.. 2006

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14067:2013** Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication., p. 64. 2013.

LEHTINEN, H.; SAARENTAUS, A.; ROUHIAINEN, J.; PITTS, M.; AZAPAGIC, A. A review of LCA methods and tools and their suitability for SMEs. **Europe Innova Eco-Innovation Bio Chem**. 2011. Disponível em: http://www.biochem-project.eu/download/toolbox/sustainability/01/120321%20BIOCHEM%20LCA_review.pdf Acesso em: 01 fev. 2018.

NAVAJAS, E.; MONGELLI, I. .; KRITZINGER, S.; HELMREICH, S.; MORGENSTERN, C.; DENNISEN, T. **Deliverable 3 of LogMan project**; Carbon Footprint (preliminary analysis). Funded by the European Commission 7th RTD Programme. Basle, Suíça, 2010. Disponível em: http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/20120404_170436_2388_Deliverable_3_FINAL_VERSION.pdf >. Acesso em: 05 fev. 2018.

NAVARRO, A.; PUIG, R.; FULLANA-I-PALMER, P.; Product vs corporate carbon footprint: Some methodological issues. A case study and review on the wine sector. **Science of The Total Environment**, v. 581–582, p. 722-733, 2017.

NETWORK FOR TRANSPORT MEASURES. **NTM Calc**. 2015. Disponível em: <https://www.transportmeasures.org/en/wiki/manuals/> . Acesso em: 05 fev. 2018.

PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; PANDEY, J. Carbon footprint: current methods of estimation. **Environmental monitoring and assessment**, v. 178, n. 1, p. 135-160, 2011.

ROMMERT, D.; JACQUELINE, B.; IOANNIS, M. Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges. **European Journal of Operational Research**, v. 219, n. 3, p. 671-679, 2012.

RUGANI, B.; VÁZQUEZ-ROWE, I.; BENEDETTO, G.; BENETTO, E. A comprehensive review of carbon footprint analysis as an extended environmental indicator in the wine sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 61-77, 2013.

SAMPAIO, R.F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1, p. 83-89, 2007.

SANTOS, J. S.; BORTOLON, K.; CHIROLI, D.; OIKO, O. Logística verde: conceituação e direcionamentos para aplicação. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 19, n. 2, p. 314-331, 2015.

THE BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Publicly Available Specification PAS 2050: 2011** - Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. Londres, 2011. Disponível em: <http://shop.bsigroup.com/upload/shop/download/pas/pas2050.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2017.

WIEDMAN, T.; MINX, J. **A Definition of “Carbon Footprint”**. ISA UK Research Report 07-01. In: C.C. Pertsova, Ecological Economics Research Trends: Chapter 1, pp. 1-11, Nova Science Publishers, Hauppaug. Nova Iorque, EUA. 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/247152314_A_Definition_of_Carbon_Footprint. Acesso em: 27 ago. 2016.

WORLD RESOURCE INSTITUTE. **Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard**. 2011. Disponível em: http://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf . Acesso em: 19 fev. 2018.

WORLD RESOURCE INSTITUTE. **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol: Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. 2. ed, 2008. Disponível em: https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/arquivos.gvces.com.br/arquivos_ghg/152/especificacoes_pb_ghgprotocol.pdf . Acesso em: 23 abr. 2017.

WORLD RESOURCE INSTITUTE. **Ferramenta de Cálculo**. 2017. Disponível em:
<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/ferramenta-de-calculo> . Acesso em: 28 ago. 2017.

WORLD RESOURCE INSTITUTE. **What we do**. 2018. Disponível em:
<http://www.wri.org/our-work> . Acesso em: 12 fev. 2018.