

Article

## Potencial de redução de emissão de CO<sub>2</sub> pelo uso de transporte ferroviário: um estudo de caso no Brasil

Silva, P.B.<sup>1,3,\*</sup>, Ribeiro, R.L.<sup>2,3</sup>, Vieira, F.A.<sup>3</sup>, Brasil, A.C.M.<sup>3</sup> and Ribeiro, R.P.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil, Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde; philippe.silva@ifgoiano.edu.br

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia; rogerio.ribeiro@ufu.br

<sup>3</sup> Programa de Pós-Graduação em Transportes, Universidade de Brasília; fabianoadriano@hotmail.com; ambrasil@unb.br

<sup>4</sup> Terminal de Armazenamento e Transbordo – Uberlândia, Companhia de Armazéns e Silos do Estado de Minas Gerais; ronaldoagri@gmail.com

\* Correspondence: philippe.silva@ifgoiano.edu.br

Received: 19/08/2019; Accepted: 10/03/2020; Published: 02/09/2020

**Resumo:** No Brasil, o setor de transporte de cargas depende fortemente de fontes de energia não renováveis, resultando em altas emissões de GEE. Neste aspecto, o modo ferroviário é ambientalmente mais sustentável que o rodoviário e ainda pode conduzir à menores custos logísticos. O presente trabalho se propôs a avaliar o potencial de redução das emissões de CO<sub>2</sub> pelo uso de transporte ferroviário de carga em comparação às atuais emissões equivalentes do transporte rodoviário, recorrendo a um estudo de caso em um importante trecho de escoamento de grãos para exportação no Brasil. Foram calculadas as emissões, considerando três tipos de locomotivas e dois tipos de caminhões, mediante uso do carregamento médio de um trem convencional e conversão, de forma equivalente, em carga para veículos rodoviários, permitindo a comparação compatível entre os resultados. As emissões foram determinadas como relação entre o consumo de combustível e emissões equivalentes (fator de emissão de CO<sub>2</sub> do IPCC). Como resultado observou-se a maior eficiência energética do transporte ferroviário em todos os casos, com redução de até 37% das emissões em relação ao modo rodoviário. Além disso, o transporte ferroviário também apresentou um custo estimado 40% mais barato que o rodoviário. Tais constatações corroboram com estudos anteriores e reforçam a relativa sustentabilidade do transporte ferroviário frente ao rodoviário no caso do transporte de cargas, em termos de emissões de CO<sub>2</sub>.

**Palavras-chave:** Emissões de CO<sub>2</sub>. Transporte ferroviário. Transporte rodoviário. Transporte e meio ambiente.

## Potential reduction in CO<sub>2</sub> emission through the use of rail transport: a case study in Brazil

**Abstract:** The cargo transport sector strongly depends on non-renewable energy resources in Brazil, resulting in high greenhouse gas emission (GGE). Considering this aspect, the rail mode is environmentally more sustainable than the road one and also may conduct to lower logistic costs. The present study aimed to evaluate the potential reduction in CO<sub>2</sub> through the use of cargo rail transport in comparison to the current equivalent emissions from the road transport, making use of a case study in an important section of grain transport to

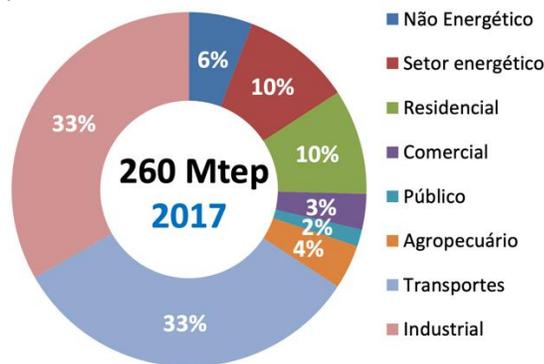
exportation in Brazil. The emissions were calculated considering three sorts of locomotives and two kinds of trucks, according to the use of average loading of a conventional train and the conversion, in an equivalent way, in cargo to road vehicles, allowing a compatible comparison between the results. The emissions were determined as the relation between the fuel consumption and the equivalent emission (CO<sub>2</sub> emission factor from IPCC). As result, it was observed a greater energy efficiency for the rail transport in all the cases, with the reduction up to 37% in the emissions if compared to the road transport. Moreover, the rail transport also showed an estimated cost 40% cheaper than the road transport. Such findings corroborate the previous studies and reiterate the relative sustainability of the rail transport compared to the road one, considering the cargo transport in terms of CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> emissions. Rail transport. Road transport. Transport and environment.

## 1. Introdução

Os sistemas de transportes têm a função de interligar produtores e consumidores, permitindo a troca de mercadorias e serviços gerados pelos primeiros e que satisfazem as necessidades e/ou os desejos dos segundos. Este conceito permite concluir que os impactos dos sistemas de transportes têm uma distribuição muito ampla, que transcende enormemente a área geográfica ocupada diretamente pelo sistema (Bellia e Bidone, 1993).

Essa integração se dá a custas de consumo energético que apresenta a segunda maior participação em emissões de gases de efeito estufa projetada para 2020. O setor de transportes por sua vez, representa 33% do consumo brasileiro de derivados de petróleo (EPE, 2018) e, por conseguinte, o principal setor responsável pelos danos ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis, como se nota na Figura 1.



**Figura 1.** Consumo brasileiro de derivados de petróleo por setores  
Fonte: EPE (2018)

Todo o consumo energético, a nível mundial, levou as emissões de dióxido de carbono a dobrarem desde 1971, sendo o aumento mais intensificado entre 2000 e 2010, contrariando as diversas políticas de mitigação das mudanças climáticas (IEA, 2014; IPCC, 2014). No cenário internacional, o Brasil figura em 13ª posição no ranking mundial dos principais países emissores de gases de efeito estufa (IEA, 2012).

Tais dados denotam a importância da redução das emissões de gases de efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono, para a minoração das alterações climáticas. E para tanto, o Brasil necessita buscar a sustentabilidade, do ponto de vista energético, dos modos de transportes com vistas a conquistar reais melhorias.

O modo ferroviário é ambientalmente mais sustentável que o rodoviário e pode conduzir à menores custos logísticos (Vilaça, 2011). Neste sentido, é importante desenvolver estudos que façam a avaliação comparativa entre o desempenho energético dos dois modos de transportes, buscando reiterar a necessidade de ampliação do transporte ferroviário na matriz de transportes brasileiras, dado seus ganhos ambientais.

Isso se torna justificável quando se considera a movimentação de mais de 87.5 milhões de toneladas de cargas no Porto de Santos para exportação em 2015, tendo a predominância de granéis (CODESP, 2016). As ferrovias que atendem ao Porto de Santos transportam atualmente apenas 13% da movimentação total do porto. Essa porcentagem pode ser aumentada, uma vez que o transporte ferroviário utiliza menor área para a mesma quantidade de carga transportada (os trens ocupam menos espaço do que os caminhões, tanto nas vias comuns quanto nos terminais de embarque e desembarque) e permitem aumentar a produtividade das operações dos terminais e movimentar uma quantidade maior de carga na mesma área de cais.

Complementarmente, com destaque para a sustentabilidade, o IPCC (2007) indica que mudanças do transporte rodoviário para o ferroviário e fluvial e do transporte de passageiros de baixa capacidade para alta capacidade, bem como o uso da terra, planejamento urbano e transporte não-motorizado, oferecem oportunidades de mitigação dos gases de efeito estufa, dependendo das condições e políticas locais.

Destarte, inventariar as emissões de CO<sub>2</sub> oriundas do transporte ferroviário e comparação com emissões de carregamento equivalente no transporte rodoviário é o objetivo central do trabalho.

Os inventários de emissões atmosféricas são instrumentos de gestão ambiental que permitem correlacionar os agentes emissores com os tipos e a carga de gases e poluentes que cada um emite ao longo do tempo, constituindo elementos estratégicos para a orientação de medidas mais eficazes de intervenção em diferentes campos, desde os técnico-operacionais, até o campo em que se dá o aprimoramento de políticas setoriais e seus mecanismos regulatórios. Dentre suas múltiplas finalidades, os inventários, dependendo do grau de detalhamento e da qualidade das informações disponíveis, são empregados na avaliação de potenciais impactos ambientais e como subsídio para definição de ações preventivas e corretivas que se aplicam, por exemplo, à gestão da qualidade do ar e ao enfrentamento das Mudanças Climáticas (PBMC, 2012).

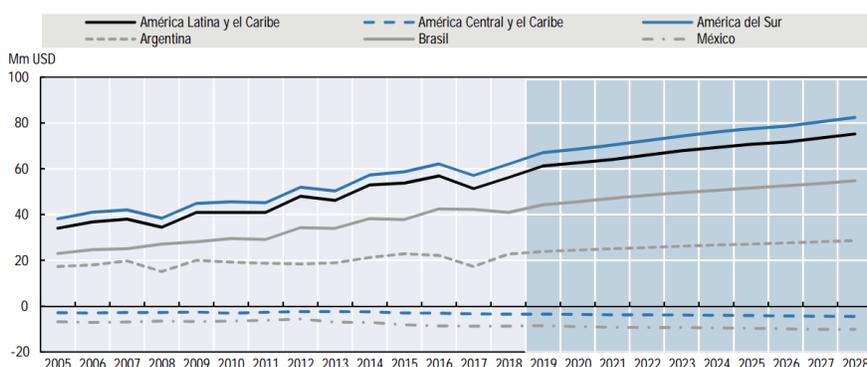
Para atingir o objetivo, fez-se um estudo de caso do trecho de Uberaba (MG) à Santos (SP). A escolha se deu devido à existência do Terminal Integrado Uberaba, com capacidade para movimentar 6.3 milhões de toneladas de grãos (soja e milho) e 2.4 milhões de toneladas de açúcar por ano, além de ser um porto seco, com localização estratégica para escoamento da produção de Goiás, Mato Grosso e Triângulo Mineiro.

## 2. Revisão da Literatura

O Brasil figura entre as dez maiores economias mundiais; o setor agrícola desempenha um papel importante neste desempenho econômico. Segundo OECD/FAO (2015), a agricultura brasileira alcançou um forte crescimento nas últimas três décadas: a produção agrícola mais do que dobrou em volume, comparada ao nível registrado em 1990; a produção pecuária praticamente triplicou; o setor contribui para a balança comercial do país; as exportações da agricultura e das indústrias agroalimentares totalizaram mais de US\$ 86 bilhões em 2013, sendo responsáveis por 36% do total das exportações.

Nos últimos vinte anos, o setor agrícola brasileiro cresceu rapidamente com base na produtividade, bem como na expansão e consolidação da fronteira agrícola nas regiões Centro-Oeste e Norte. Apesar do mercado interno absorver a maior parte da produção agrícola, esse crescimento foi impulsionado principalmente pela expansão da produção de produtos destinados à exportação, tornando-se o segundo maior exportador agrícola mundial (OECD/FAO, 2015).

As perspectivas da agricultura brasileira permanecem positivas, apesar da tendência de crescimento mais lento. Nos próximos anos as safras do Brasil devem continuar crescendo e sendo essencial para o comércio agrícola da América Latina, conforme Figura 2.



**Figura 2.** Balanças de comércio agrícola na região da América Latina e Caribe  
Fonte: OECD/FAO (2019)

As projeções indicadas reforçam a necessidade de aplicação de medidas voltadas ao transporte agrícola que visem minimizar as emissões de poluentes. Dentre elas, pode-se evidenciar a utilização de modos de transportes de carga com maior eficiência energética, como se supõe que seja o ferroviário e que é alvo de avaliação deste trabalho. Assim, de forma a embasar o estudo, são apresentados na sequência aspectos de cálculo de emissões de poluentes.

### 2.1. Estimativa de emissão de poluentes

A logística brasileira é prioritariamente rodoviária, fazendo com que os veículos automotores rodoviários sejam um dos principais emissores de poluentes para a atmosfera, assim, é de grande importância para o trabalho analisarmos qual a contribuição que tem os caminhões na emissão do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Os inventários de emissão de poluentes atmosféricos têm por finalidade estimar as emissões numa dada área geográfica por um período de tempo determinado, permitindo estimar os efeitos das emissões atmosféricas na qualidade do ar.

O dióxido de carbono é o gás de efeito estufa antrópico mais importante (IPCC, 2007). A concentração atmosférica global de dióxido de carbono aumentou de um valor pré-industrial de cerca de 280 ppm para 379 ppm em 2005. A principal fonte de aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono desde o período pré-industrial se deve ao uso de combustíveis fósseis, com a mudança no uso da terra contribuindo com uma parcela significativa, porém menor. Os métodos recomendados pelo IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - para estimativa de emissões e remoções de Gases de Efeito Estufa (GEE), estão divididos em *Tiers*, que representam os diferentes graus de complexidade metodológica, de acordo com os diferentes níveis de atividades e detalhes de tecnologia.

Waldron *et al.* (2006) cita três alternativas metodológicas para estimativas de emissões ferroviárias recomendadas pelo IPCC:

- **Tier 1:**

Esse método utiliza o consumo total de combustível e um fator de emissão padronizado, de forma que não dê para considerar a utilização de locomotivas distintas em um mesmo comboio e as diferentes variações de emissões para cada uma delas. É calculada conforme a Equação 1:

$$E = \sum_j (C_j * EF_j) \quad (1)$$

Onde

$E$ : emissões [kg]

$C_j$ : consumo de combustível do tipo  $j$  [TJ]

$EF_j$ : fator de emissão para o tipo  $j$  de combustível [kg/TJ]

$j$ : tipo de combustível

- **Tier 2:**

Utiliza dados de consumo e emissão específicos por locomotiva, conforme a Equação 2.

$$E = \sum_j \sum_i (C_{ij} * EF_{ij}) \quad (2)$$

Onde

$E$ : emissões [kg]

$C_{ij}$ : consumo de combustível do tipo  $j$  por locomotivo do tipo  $i$  [TJ]

$EF_{ij}$ : fator de emissão para locomotiva do tipo  $i$  de combustível tipo  $j$  [kg/TJ]

$j$ : tipo de combustível

$i$ : tipo de locomotiva

- **Tier 3**

Se baseia em dados detalhados de potência média de cada locomotiva ponderada pelo fator de carregamento, conforme Equação 3.

$$E = \sum_i (N_i * H_i * P_i * LF_i * EF_i) \quad (3)$$

Onde

$E$ : emissões [kg]

$N_i$ : número de locomotivas do tipo  $i$

$H_i$ : uso da locomotiva anual [h]

$P_i$ : potência média da locomotiva  $i$  [kW]

$LF_i$ : fator de carregamento médio da locomotiva  $i$  [adimensional entre 0 e 1]

$EF_i$ : fator de emissão médio para locomotiva  $i$  [kg/kWh]

$i$ : tipo de locomotiva

É necessário calcular as emissões também das locomotivas alocadas nos pátios de manobras, conforme a Equação 4.

$$C_m = N * C * D \quad (4)$$

Onde

$C_m$ : consumo de manobra [TJ]

$N$ : número de locomotivas nos pátios de manobras [adimensional]

$C$ : consumo médio de combustível por locomotiva por dia [TJ]

$D$ : número médio de dias em operação das locomotivas por ano [adimensional]

Se o consumo médio diário da locomotiva de manobra for desconhecido, a Agência Proteção Ambiental Americana - USEPA aconselha aproximar o valor para 863 litros de diesel por dia e 365 dias de operação (Waldron *et al.*, 2006).

Além das metodologias utilizadas pelo IPCC, Silva (2015) cita outras metodologias como SIT onde, basicamente, a USEPA (2009) ressalta que as emissões de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) são altamente dependentes das propriedades do combustível, não variando tanto com as especificidades técnicas do motor (Equações 5 e 6). Por outro lado, as quantidades de óxido nitroso ( $N_2O$ ) e de metano ( $CH_4$ ) devem ser calculadas de forma indireta, assumindo que elas são proporcionais aos fatores respectivos de  $NO_x$  e de hidrocarbonetos. Os fatores de emissão variam, conforme o ano de manufatura da locomotiva, sendo que o *Tier 1* é aplicado às locomotivas produzidas antes de 2001, o *Tier 2*, relativo aos modelos de 2001 a 2004, e por fim o *Tier 3* é relativo as locomotivas mais recentes.

$$FCO_2 = D * (3.66 \text{ g } CO_2 / \text{g Carbono}) * C \quad (5)$$

$$FSO_2 = D * (3.66 \text{ g } CO_2 / \text{g Carbono}) * S \quad (6)$$

Onde

$FCO_2$ : fator de emissão de  $CO_2$  [g/galão]

$FSO_2$ : fator de emissão de  $SO_2$  (g/galão)

$D$ : densidade do combustível [g/galão]

$C$ : conteúdo de carbono do combustível [% de massa]

$S$ : conteúdo de enxofre do combustível [% de massa]

A metodologia criada pelo *World Resources Institute* (WRI) - O *Greenhouse Gas Protocol* (GHG Protocol) está alinhada com as normas da *International Organization for Standardization* - ISO e com os modelos de emissão do IPCC, sendo incluídos no inventário os principais gases de efeito estufa definidos pelo Protocolo de Kyoto: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ). A modelagem é bastante trivial, sendo necessário fornecer apenas o consumo energético do período ou, alternativamente, apresentar a distância percorrida e o peso da carga transportada.

O modelo ARTEMIS foi desenvolvido pelos pesquisadores da Universidade Técnica da Dinamarca em 2005 no âmbito de um projeto de pesquisa financiado pela Comissão Europeia, com o intuito de simular padrões de operação de transporte e as consequentes interferências nas emissões (Silva, 2015).

Este modelo leva em consideração variáveis específicas da frota e da geometria da via para o cálculo do consumo de combustível (ao contrário dos modelos do IPCC, EPA e GHG Protocol). As forças de resistência à condução são calculadas a partir de uma matriz de operação, capaz de fornecer a distribuição padrão da velocidade e aceleração do trem. A integral das forças de atuação no trem representará o consumo energético, que está diretamente associado às emissões de gases de efeito estufa. O consumo energético de uma locomotiva pode ser obtido por meio da integral das forças instantâneas atuantes na distância percorrida.

Segundo Cazzola (2013), a modelagem de emissões no ForFITS pode ser resumida em quatro passos: geração de atividade de transporte, avaliação de novos registros de veículos, cálculo do uso energético e estimativa de emissões de  $\text{CO}_2$ , o ForFITS enfatiza o levantamento da intensidade energética para cada modelo de veículo, conforme Equação 7.

$$F_i = A * \hat{a} \hat{s}_i * I_i \quad (7)$$

Onde

$F_i$ : uso energético no setor [l/ano]

$A$ : atividade setorial [veículo-km]

$S_i = A_i / A$ : participação da classe de veículo  $i$  no setor [adimensional]

$I_i = F_i / A_i$ : intensidade energética para a classe de veículo  $i$  [l/veículo-km]

Em seguida, a estimativa de emissão pode ser calculada, multiplicando o consumo obtido através da Equação 7 pelo fator de emissão específico para cada grupo de veículo.

$$E = \hat{a} F_i * EF_i \quad (8)$$

Onde

$E$ : total de emissão no setor [kg  $\text{CO}_2$ /ano]

$EF_i$ : fator de emissão por unidade de energia relativa ao grupo de veículo  $i$  [kg  $\text{CO}_2$ /l]

A metodologia CARB (*California Air Resources Board*) foi desenvolvida para estimar as emissões de hidrocarbonetos (HC), particulados, óxido de nitrogênio (NOx), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e monóxido de carbono (CO), referentes a operação de locomotivas em seis regiões específicas da Califórnia: Costa Central, San Diego, Costa Sul, San Joaquin, Sacramento e área da Baía. Ao contrário dos métodos de cálculo de emissão usuais, esta modelagem não é baseada no consumo de combustível, mas sim no tempo transcorrido em cada marcha e na respectiva emissão associada, conforme apresentado na Equação 9 a seguir.

$$E_a = \hat{a}^t c_t * \hat{a}^i L_{it} * \hat{a}_i \hat{a} EF_{ij} * T_{ij} \quad (9)$$

Onde

$E_a$ : emissões anuais [kg $\text{CO}_2$ /ano]

$C_t$ : total anual de trens do tipo  $t$  [adimensional]

$L_{it}$ : número de locomotivas  $i$  por trem  $t$  [adimensional]

$EF_{ij}$ : fator de emissão da locomotiva  $i$  na marcha  $j$  [kg CO<sub>2</sub>/hora]

$T_{ij}$ : tempo da locomotiva  $i$  na marcha  $j$  [horas]

Para realizar os cálculos, é necessário conhecer a operação origem/destino dos trens, bem como obter os respectivos perfis de marcha e fatores de emissão, sendo imprescindível entrar em contato com fabricantes de locomotivas, empresas ferroviárias e institutos de pesquisa (Booz Allen Hamilton Inc., 1991).

A fim de facilitar o tratamento dos dados, é sugerida uma categorização dos resultados por finalidade do trem, separando em transporte intermodal, misto, operações locais e de manobra.

O modelo da Universidade da Califórnia Davis – UCD calcula as emissões espaciais associadas ao transporte ferroviário, de modo a viabilizar a quantificação dos gases de efeito estufa em corredores de carga específicos e a previsão do potencial de redução de emissões através da substituição modal.

A maioria dos modelos sugere a utilização de dados agregados de consumo anual de combustível. Entretanto, para estudar o volume emitido por corredores de carga é necessário conhecer a eficiência energética de cada composição ferroviária em todos os trechos da rota ou conhecer as especificidades relativas ao transporte, tais como a velocidade do trem, o perfil aerodinâmico do veículo e a inclinação da via (Gould e Niemeier, 2011).

A obtenção destes dados regionais enfrenta significativos obstáculos, uma vez que as informações geralmente são confidenciais e as medições em maior nível de detalhe demandam a participação coordenada de funcionários de diferentes áreas da empresa, os quais serão responsáveis pelo acompanhamento das medições. Tendo em vista estas particularidades, foi desenvolvido o modelo UCD baseada no consumo de combustível multiplicado pelo fator de emissão (Equação 10), e inclui o detalhamento espacial do consumo energético nos diversos trechos da malha ferroviária, conforme Equação 11.

$$E_i = FC_i * FE_i \quad (10)$$

$$FC_i = \hat{\alpha} d \frac{TD_{id}}{FE_{id}} \quad (11)$$

Onde

$E_i$ : estimativa de emissão para o trecho  $i$  [g]

$FC_i$ : consumo de combustível para o trecho  $i$  [galão]

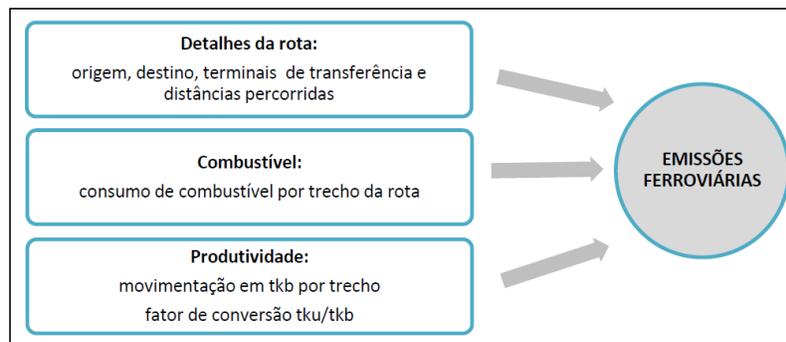
$FE_i$ : fator de emissão para HC, CO, NOx e PM10 [g/galão]

$TD_{id}$ : densidade de tráfego de viagens no trecho  $i$  em direção  $d$  [GTM]

$FE_{id}$ : eficiência energética do trecho  $i$  para viagens na direção  $d$  [GTM/galão]

Segundo Gould e Niemeier (2011), a densidade de tráfego  $TD_{id}$  deve ser obtida diretamente com a concessionária responsável. Já a eficiência energética  $FE_{id}$  para cada trecho e tipo de trem é determinada através de modelo estatístico específico, que relaciona o tipo de trem e a inclinação da via com a intensidade energética.

Em Silva (2015) foi desenvolvida uma metodologia que propõe uma forma de avaliação das emissões geradas por cada modo de transporte em uma rota específica. Em geral, as ferrovias monitoram o consumo de combustível em litros/TKB por trechos e não o consumo instantâneo, sendo que este acompanhamento dificilmente é desagregado por composição ferroviária no trecho. Os extremos do trecho podem ser definidos em função dos limites, cruzamentos e ramificações da rede. Dados deverão ser levantados junto à concessionária como modelos de locomotivas utilizadas na rota em questão, a quantidade de vagões usualmente adicionados à composição, o peso geralmente carregado em cada vagão e as taras dos vagões, de forma a garantir a estimativa da carga líquida da composição e de seu respectivo peso bruto. A Figura 3 mostra os Inputs sugeridos para o cálculo das emissões ferroviárias.



**Figura 3.** Inputs sugeridos para o cálculo das emissões ferroviárias  
Fonte: Silva (2015)

Para o trajeto intermodal (rodoviário + ferroviário), Craig *et al.* (2013) propõe o uso da expressão:

$$E_i = D_i * Tr * EFr + \sum_t^f (Dt * Tt * Eft) + Df * Tr * EFr \quad (12)$$

Onde

$E_i$ : emissão total da rota intermodal  $i$  [ $\text{kgCO}_2/\text{t}$  útil]

$D_i$ : distância rodoviária da origem  $i$  até o terminal ferroviário [km]

$Tr$ : fator de consumo de combustível por tonelada-quilômetro movimentada por rodovia [ $\text{l}/\text{t} \cdot \text{km}$ ]

$EFr$ : fator de emissão por litro de diesel consumido em rodovia [ $\text{kgCO}_2/\text{l}$ ]

$Dt$ : distância ferroviária no trecho ferroviário  $t$  [km]

$Tt$ : fator de consumo de combustível por Tonelada-quilômetro-útil movimentada no trecho ferroviário  $t$  [ $\text{l}/\text{TKU}$ ]

$Eft$ : fator de emissão por litro de diesel consumido no modo ferroviário [ $\text{kgCO}_2/\text{l}$ ]

$Df$ : distância rodoviária do terminal ferroviário de desembarque ao destino [km]

Utilizou-se fator de emissão para o transporte ferroviário apresentado nas Diretrizes Nacionais para Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa do IPCC (Waldron *et al.*, 2006).

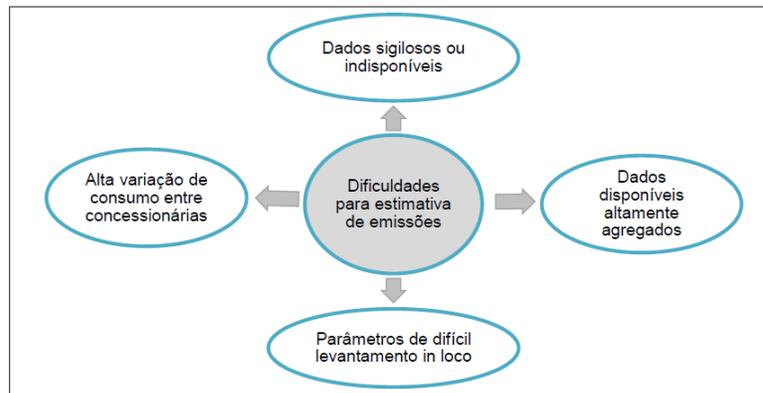
No caso das emissões rodoviárias, os cálculos serão efetuados conforme a Equação (1) de forma a obter as emissões equivalentes à ferroviária, de forma a comparar os dois modos de transporte para o mesmo trajeto. Para efetuar esses cálculos faz-se necessário a distância total percorrida e o consumo de combustível em litros/km. Esse consumo foi realizado através de pesquisa com transportador que fazem o percurso, levando-se em conta a média em diferentes viagens e considerou-se apenas a viagem de ida, com o veículo carregado.

### 3. Método e Estudo de Caso

Para alcançar o objetivo do trabalho, o método empregado teve como procedimentos básicos: definição do trecho para o estudo; execução de Revisão Sistemática de Literatura para identificação dos métodos existentes para inventário de emissões e definição do que seria empregado; coleta dos dados operacionais junto à operadora da ferrovia; análise dos dados e obtenção de resultados; discussões e conclusões.

Visando demonstrar o melhor desempenho energético (menor emissão de  $\text{CO}_2$ ) do transporte ferroviário de cargas em detrimento do rodoviário, considerando a importância logística, adotou-se para o estudo de caso o trecho de Uberaba (Terminal Integrado Uberaba) à Santos (Terminal de Granéis do Porto de Santos), no qual foram inventariadas as emissões de  $\text{CO}_2$  para os dois modos de transporte referidos.

Na Revisão da Literatura foram elencados alguns métodos para cálculo de emissões de  $\text{CO}_2$  no transporte ferroviário e uma metodologia para a mensuração equivalente no modo rodoviário. Como apresentado por Silva (2015), inúmeras são as dificuldades de obtenção de dados para o inventário de emissões, conforme Figura 4.



**Figura 4.** Entraves na estimativa de emissões  
Fonte: Silva (2015)

Diante destes entraves, a metodologia que se adequava aos dados disponibilizados, preservando, no entanto, a fiabilidade e premissas da estimativa, foi a proposta por Silva (2015). A VLI (Valor da Logística Integrada Multimodal S.A.), operadora do Terminal Integrado Uberaba, forneceu o carregamento médio de um trem convencional com destino à Santos. Este carregamento será tomado como referência para cálculo das emissões ferroviárias e será convertido, de forma equivalente, em carga para veículos rodoviários, permitindo a comparação compatível entre os resultados.

### 3.1. Modo ferroviário

Para o cálculo das emissões ferroviárias, utilizou-se a parcela da Equação (12) correspondente às emissões do transporte ferroviário, resultando na expressão a seguir.

$$E_f = \hat{a}^t (D_f * V * T_f * E_{ff}) \quad (13)$$

Onde

$E_f$ : emissões ferroviárias [kgCO<sub>2</sub>/ano]

$D_f$ : distância ferroviária no trecho ferroviário  $t$  [km]

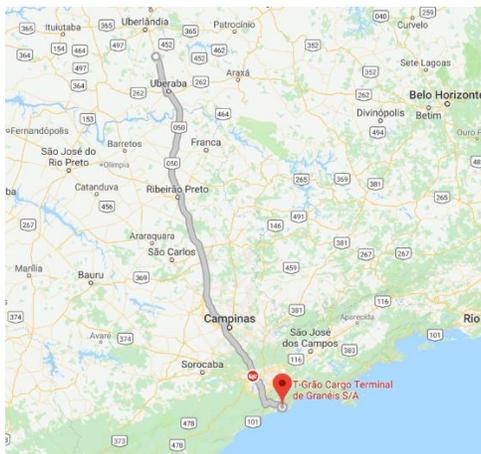
$V$ : carga movimentada de Uberaba à Santos [t]

$T_f$ : fator de consumo de combustível por TKU de granéis movimentados para cada trecho ferroviário [l/TKU]

$E_{ff}$ : fator de emissão por litro de diesel consumido no modo ferroviário [kgCO<sub>2</sub>/l]

- **Distância do trecho ferroviário**

O trecho ferroviário entre o Terminal Integrado Uberaba e Terminal de Granéis de Santos totaliza 735 km, dado fornecido pela VLI. A Figura 5 apresenta o trecho analisado.



**Figura 5.** Trecho analisado: Terminal de Uberaba – Porto de Santos  
Fonte: Google Maps

- **Carga movimentada**

Utilizou-se para fins de cálculo a carga aproximada de um trem convencional com 80 vagões e 2 locomotivas, fornecido pela VLI, que é 7,400 toneladas e 3.845 MTKU (milhões de toneladas por quilômetro útil).

- **Fator de consumo Tf**

No trecho operado pela VLI são utilizados três tipos de locomotivas, cujos consumos estão apresentados na Tabela 1. De posse do consumo, distância e toneladas transportadas foi possível obter o fator de consumo Tf, também apresentado na Tabela 1.

Utilizou-se para fins de cálculo a carga aproximada de um trem convencional com 80 vagões e 2 locomotivas, fornecido pela VLI, que é 7,400 toneladas e 3.845 MTKU (milhões de toneladas por quilômetro útil). Admite-se que cada locomotiva é responsável pela tração de metade do carregamento, portanto, para fins de cálculo utilizou-se carga bruta de 3,700 toneladas e 1.923 MTKU.

**Tabela 1.** Fatores de consumo Tf

Locomotiva	Consumo [l/km]	Distância do trecho [km]	Carga bruta [t]	Litros consumidos	TKU	Tf [l/TKU]
GT46	0.00487	735	3700	13,243.965	1,922,500	0.0068889
SD70-BB	0.00464	735	3700	12,618.48	1,922,500	0.0065636
SD70ACe	0.00456	735	3700	12,400.92	1,922,500	0.0064504

- **Fator de emissão E<sub>ff</sub>**

Para o cálculo do fator de emissão por litro de diesel consumido no modo ferroviário, utilizou-se o fator de emissão para o transporte ferroviário proposto por IPCC (2006) com valor Default de 74,100 kgCO<sub>2</sub>/Tj. Como características do óleo diesel foi considerada a densidade 840 kg/m<sup>3</sup> e Poder calorífico inferior de 10,100 kcal/kg, conforme valores médios de 2015 apresentados por ANP (2016). E para conversão de unidades, adotou-se 1 joule igual a 0.239 caloria, também conforme ANP (2016).

Reunidos estes dados, pôde-se calcular o E<sub>ff</sub>, como pode ser visto abaixo na sequência de equações (14), (15) e (16).

$$\text{Poder calorífico por litro} = \frac{840 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \frac{10100 \text{ kcal}}{\text{kg}} = \frac{8484000 \text{ kcal}}{\text{m}^3} = \frac{8484 \text{ kcal}}{\text{l}} \quad (14)$$

$$\text{Litros consumidos por Tj} = \frac{239000000 \text{ kcal}}{8484 \text{ kcal}} = 28170.674 \text{ l} \quad (15)$$

$$EFF = \frac{74100 \text{ kgCO}_2}{\frac{T_j}{28170,64l}} = 2.63 \text{ kgCO}_2 / l \quad (16)$$

### 3.2. Modo rodoviário

As emissões de dióxido de carbono por rodovia foram calculadas de acordo com o escopo *Tier 1* das Diretrizes Nacionais para Inventários de Gases de Efeito Estufa do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC publicadas em 2006 (Silva, 2015).

Na alternativa rodoviária serão considerados dois tipos de caminhões, o bitrem e o rodotrem. O bitrem é uma combinação de veículos de carga composta por 7 eixos, o que permite o transporte de um peso bruto total combinado (PBC) de 57 toneladas, sendo 37 toneladas úteis de carga. O rodotrem que tem 9 eixos e possibilita um PBC de 74 toneladas, sendo 50 toneladas de carga útil.

A distância rodoviária foi calculada com a ferramenta *Google Maps*, considerando como origem o Terminal Integrado de Uberaba, localizado no km 116 da rodovia BR-050, e como destino o terminal Terminal de Graneis S.A., no Porto de Santos. Foi levado em consideração o caminho de menor tempo de viagem.

O fator de emissão para caminhões a diesel, que possibilita converter consumo de combustível em emissões de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) é 2.671 kg/l, conforme 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários elaborado pelo MMA (2011).

Da Equação 1 tem-se:

$$Er = \sum_j (C_j * EF_j) \quad (17)$$

Onde

*Er*: emissão total na rota rodoviária [kgCO<sub>2</sub>/ano]

*C<sub>j</sub>*: total consumido do combustível *j* [TJ]

*EF<sub>j</sub>*: fator de emissão rodoviário para o tipo de combustível *j* [kg/TJ]

*j*: tipo de combustível [diesel]

Quando o consumo de combustível total para a rota rodoviária não for conhecido, utiliza-se um fator de consumo médio conforme a Equação (18).

$$Er = Dr * Tr * EFr \quad (18)$$

Onde

*Er*: emissão total da rota rodoviária [kg CO<sub>2</sub>/t útil]

*Dr*: distância rodoviária da origem até o destino final [km]

*Tr*: fator de consumo de combustível por tonelada-quilômetro movimentada por rodovia [l/t.km]

*EFr*: fator de emissão por litro de diesel consumido em rodovia [kgCO<sub>2</sub>/l]

A partir de entrevistas com transportadores, obteve-se um consumo médio de 1.9 km/l para o bitrem e 1.5 km/l para o rodotrem. O cálculo do consumo *T* é demonstrado nas Equações (19) e (20) para consumo do bitrem e do rodotrem respectivamente.

$$\frac{1}{\left(\frac{2.3 \text{ km}}{l}\right) * 37 \text{ t}} = \frac{0.014 \text{ l}}{t} * \text{ km} \quad (19)$$

$$\frac{1}{\left(\frac{1.5 \text{ km}}{l}\right) * 50 \text{ t}} = \frac{0.013 \text{ l}}{t} * \text{ km} \quad (20)$$

## 4. Resultados e Discussão

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos e discussões pertinentes.

#### 4.1. Modo ferroviário

Com os parâmetros já determinados e aplicação do procedimento de cálculo, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 2. Estão apresentadas as emissões de CO<sub>2</sub> por tipo de locomotiva e por tipo de carregamento: bruto e útil.

**Tabela 2. Emissões totais da viagem (Uberaba-Santos) por tipo de carregamento**

Carregamento Bruto				Carregamento Útil			
<b>Df [km]</b>	735	Ef,1 GT46 [kgCO <sub>2</sub> ]	49,271.38	<b>Df [km]</b>	735	Ef,1 GT46 [kgCO <sub>2</sub> ]	34,834.20
<b>V [t]</b>	3,700	Ef,1 SD70-BB [kgCO <sub>2</sub> ]	46,944.74	<b>V [t]</b>	2,615.85	Ef,1 SD70-BB [kgCO <sub>2</sub> ]	33,189.30
<b>Tf, GT46 [l/TKU]</b>	0.006889	Ef,1 SD70ACe [kgCO <sub>2</sub> ]	46,135.10	<b>Tf, GT46 [l/TKU]</b>	0.0068889	Ef,1 SD70ACe [kgCO <sub>2</sub> ]	32,616.89
<b>Tf, SD70-BB [l/TKU]</b>	0.006564	<b>Ef,t GT46 [kgCO<sub>2</sub>]</b>	98,542.75	<b>Tf, SD70-BB [l/TKU]</b>	0.0065636	<b>Ef,t GT46 [kgCO<sub>2</sub>]</b>	69,668.39
<b>Tf, SD70ACe [l/TKU]</b>	0.006450	<b>Ef,t SD70-BB [kgCO<sub>2</sub>]</b>	93,889.48	<b>Tf, SD70ACe [l/TKU]</b>	0.0064504	<b>Ef,t SD70-BB [kgCO<sub>2</sub>]</b>	66378,59
<b>Eff [kgCO<sub>2</sub>/l]</b>	2.63	<b>Ef,t SD70ACe [kgCO<sub>2</sub>]</b>	92,270.20	<b>Eff [kgCO<sub>2</sub>/l]</b>	2.63	<b>Ef,t SD70ACe [kgCO<sub>2</sub>]</b>	65,233.78
<b>Tf, GT46 - fator de combustível por TKU para locomotiva tipo GT46</b>							
<b>Tf, SD70-BB - fator de combustível por TKU para locomotiva tipo SD70-BB</b>							
<b>Tf, SD70ACe - fator de combustível por TKU para locomotiva tipo SD70ACe</b>							
<b>Ef,1 GT46 - emissões ferroviárias no trecho Uberaba-Santos com uso de uma locomotiva GT46</b>							
<b>Ef,1 SD70-BB - emissões ferroviárias no trecho Uberaba-Santos com uso de uma locomotiva SD70-BB</b>							
<b>Ef,1 SD70-BB - emissões ferroviárias no trecho Uberaba-Santos com uso de uma locomotiva SD70ACe</b>							
<b>Ef,t GT46 - emissões ferroviárias totais no trecho Uberaba-Santos com uso das duas locomotivas GT46</b>							
<b>Ef,t SD70-BB - emissões ferroviárias totais no trecho Uberaba-Santos com uso das duas locomotivas SD70-BB</b>							
<b>Ef,t SD70-BB - emissões ferroviárias totais no trecho Uberaba-Santos com uso de duas locomotivas SD70ACe</b>							

Na Tabela 3 são apresentados valores normalizados de emissão de CO<sub>2</sub> por unidade (TKU, TKB e km), de forma a permitir a comparação entre os modos de transporte.

**Tabela 3. Emissões por unidade (TKU, TKB e km) por tipo de locomotiva**

<b>Locomotiva</b>	<b>Ef,TKU [kgCO<sub>2</sub>/TKU]</b>	<b>Ef,TKB [kgCO<sub>2</sub>/TKB]</b>	<b>Ef,util km [kgCO<sub>2</sub>/km]</b>	<b>Ef,brut km [kgCO<sub>2</sub>/km]</b>
<b>GT46</b>	0.018119218	0.018117807	94.78693088	134.0717718
<b>SD70-BB</b>	0.017263613	0.017262268	90.3110075	127.7407832
<b>SD70ACe</b>	0.016965873	0.016964552	88.7534467	125.5376848
<b>Ef,TKU - indicador de quilos de emissões ferroviárias por unidade de TKU</b>				
<b>Ef,TKB - indicador de quilos de emissões ferroviárias por unidade de TKB</b>				
<b>Ef,util km - indicador de quilos de emissões ferroviárias por unidade de quilômetro útil</b>				
<b>Ef,brut - indicador de quilos de emissões ferroviárias por unidade de quilômetro bruto</b>				

#### 4.2. Modo rodoviário

A Tabela 4 mostra o resultado para os caminhões rodotrem e bitrem, onde calculou-se a quantidade de CO<sub>2</sub> por cada viagem de caminhão e a quantidade total de emissões equivalente ao carregamento ferroviário: 104.63 caminhões rodotrem e 14.4 caminhões bitrem.

**Tabela 4.** Emissões rodoviárias de CO<sub>2</sub> da viagem (Uberaba-Santos) por tipo de carregamento

Carregamento Bruto				Carregamento Útil			
<b>Dr [km]</b>	632	Er,1rodo [kgCO <sub>2</sub> ]	1,125.38	<b>Dr [km]</b>	632	Er,1rodo [kgCO <sub>2</sub> ]	760.39
<b>V,rodo [t]</b>	74	Er,1bitrem [kgCO <sub>2</sub> ]	888.46	<b>V, rodo [t]</b>	50	Er,1bitrem [kgCO <sub>2</sub> ]	576.72
<b>V, bitrem [t]</b>	57			<b>V, bitem [t]</b>	37		
<b>Tr, rodo [l/TKU]</b>	0.009009	<b>Er,t rodo [kgCO<sub>2</sub>]</b>	117,748.65	<b>Tr, rodo [l/TKU]</b>	0.009009	<b>Er,t rodo [kgCO<sub>2</sub>]</b>	79,559.90
<b>Tr, bitrem [l/TKU]</b>	0.009234	<b>Er,t bitrem [kgCO<sub>2</sub>]</b>	125,628.10	<b>Tr, bitrem [l/TKU]</b>	0.009234	<b>Er,t bitrem [kgCO<sub>2</sub>]</b>	81,548.06
<b>Consumo, rodo [l]</b>	421.333			<b>Consumo, rodo [l]</b>	284.6847		
<b>Consumo bitrem [l]</b>	332.6316			<b>Consumo bitrem [l]</b>	215.9187		
<b>Tr, rodo - fator de combustível por TKU para caminhão rodotrem</b>							
<b>Tr, bitrem - fator de combustível por TKU para caminhão bitrem</b>							
<b>Consumo, rodo – consumo de diesel por viagem de ida para caminhão rodotrem</b>							
<b>Consumo, bitrem – consumo de diesel por viagem de ida para caminhão bitrem</b>							
<b>Er,1rodo - emissões rodoviárias no trecho Uberaba-Santos de um caminhão rodotrem</b>							
<b>Er,1bitrem - emissões rodoviárias no trecho Uberaba-Santos de um caminhão bitrem</b>							
<b>Er,t rodo - emissões ferroviárias totais no trecho Uberaba-Santos com caminhão rodotrem (104,63 carregamentos)</b>							
<b>Er,t bitrem - emissões ferroviárias totais no trecho Uberaba-Santos com caminhão bitrem (141,4 carregamentos)</b>							

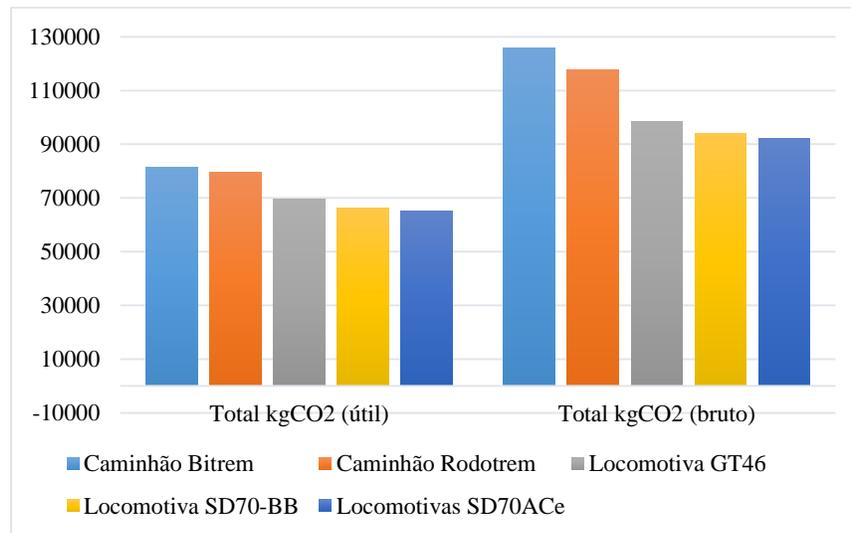
Na Tabela 5 são apresentados valores normalizados de emissão de CO<sub>2</sub> por unidade (TKU, TKB e km) por tipo de caminhão.

**Tabela 5.** Emissões por unidade (TKU, TKB e km) por tipo de caminhão

<b>Caminhão</b>	<b>Er,TKU [kgCO<sub>2</sub>/TKU]</b>	<b>Er,TKB [kgCO<sub>2</sub>/TKB]</b>	<b>Er,util km [kgCO<sub>2</sub>/km]</b>	<b>Er,brut km [kgCO<sub>2</sub>/km]</b>
<b>Rodotrem</b>	0.02406168	0.02406306	125.88591	196.3111533
<b>Bitrem</b>	0.02466439	0.02466297	129.03174	198.7786316
<b>Er,TKU - indicador de quilos de emissões rodoviárias por unidade de TKU</b>				
<b>Er,TKB - indicador de quilos de emissões rodoviárias por unidade de TKB</b>				
<b>Er,util km - indicador de quilos de emissões rodoviárias por unidade de quilômetro útil</b>				
<b>Er,brut - indicador de quilos de emissões rodoviárias por unidade de quilômetro bruto</b>				

#### 4.3. Análise dos resultados

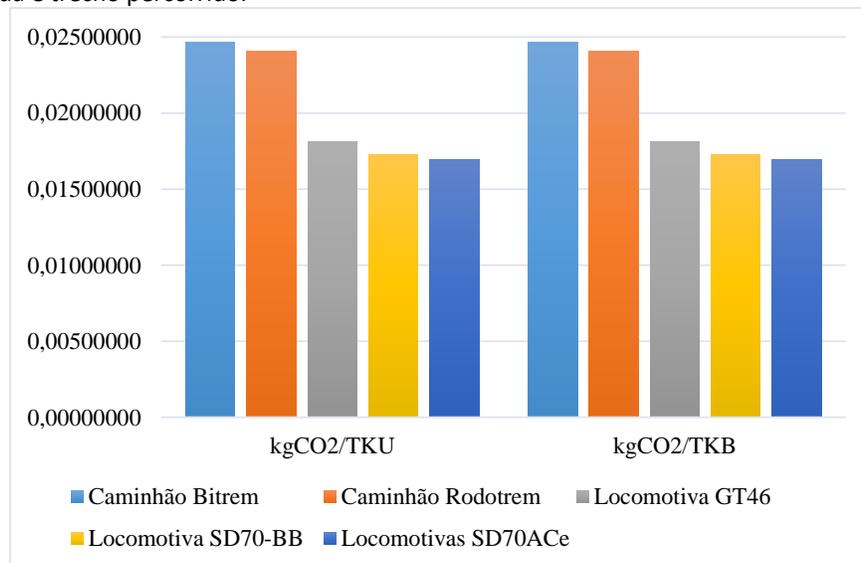
Na Figura 6 são apresentados os resultados de emissões totais de CO<sub>2</sub> para todos os veículos simulados, seja no transporte ferroviário ou rodoviário.



**Figura 6.** Emissões totais de CO<sub>2</sub>, em kg

Na Figura 7, comparando a Emissão de CO<sub>2</sub> entre o veículo rodoviário (bitrem) que é o que mais emitiu e o ferroviário (SD70ACE) que foi o que menos emitiu, foi verificado uma redução de 20% para carga útil e 27% para carga bruta.

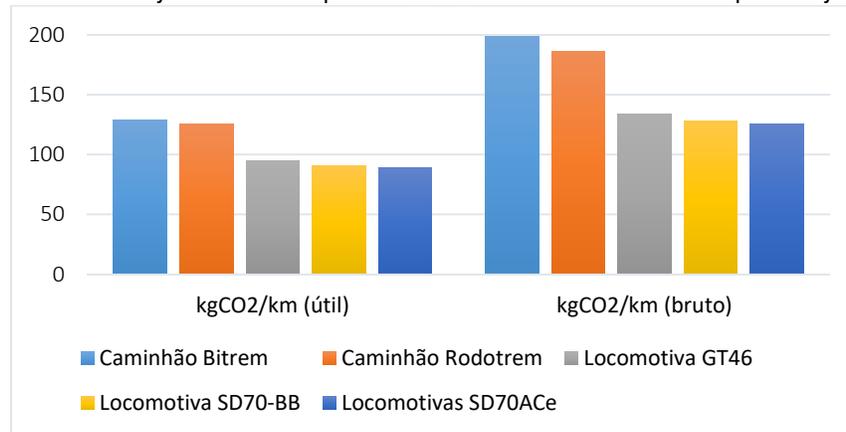
Os valores de emissões de CO<sub>2</sub> por TKU e TKB estão expressos na Figura 7, permitindo a visualização da diferença entre o índice de cada veículo simulado para o transporte de carga. Como são valores por unidade de quilômetro por tonelada (bruta ou útil), faculta a comparação do índice de emissão de poluente independente da carga transportada e trecho percorrido.



**Figura 7.** Emissões de CO<sub>2</sub> por TKU e TKB

Já na Figura 8, houve uma redução de 31% entre os veículos mencionados acima. Porém, como era esperado, os resultados de emissão obtidos por TKU e TKB são praticamente iguais, uma vez que para o cálculo foi utilizado o mesmo fator de emissão do combustível (diesel) para carga útil e bruta, confirmando a acurácia dos resultados.

Por fim, para fins de comparação, apresenta-se o Figura 8 contendo as emissões de CO<sub>2</sub> por quilômetro transportado. Percebeu-se uma diferença de 37% entre as emissões dos caminhões e locomotivas. Essa maior diferença deve-se ao fato do trajeto rodoviário possuir 120 km a menos de extensão que o trajeto ferroviário.



**Figura 8.** Emissões de CO<sub>2</sub> por quilômetro transportado

## 5. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi inventariar as emissões de CO<sub>2</sub> oriundas do transporte ferroviário e comparar com emissões de carregamento equivalente no transporte rodoviário. Como estudo de caso utilizou-se o trecho entre o terminal ferroviário de Uberaba/MG ao Terminal de Grãos no Porto de Santos/SP, em um percurso de 735 quilômetros. Esse trecho foi escolhido devido ao potencial de exportação de grãos e a importância geográfica e a alta capacidade de escoamento e produção de soja, milho e açúcar oriundo de Goiás, Mato Grosso e Triângulo Mineiro.

Como resultado, pelo modo ferroviário, o consumo médio seria de 25,500 litros de combustível e a emissão média aproximada de CO<sub>2</sub> seria de 95 toneladas, utilizando 80 vagões e 2 locomotivas. Concomitantemente, foi calculado a emissão de CO<sub>2</sub>, entre o mesmo trecho pelo modo rodoviário, sendo necessário uma frota de 105 caminhões rodotrem ou 142 caminhões bitrem para atender à mesma demanda. Como resultado, a frota consumiria mais de 45,500 litros de combustível, emitindo 121 toneladas de CO<sub>2</sub> no meio ambiente. Ambos dados para o carregamento bruto.

Além do que, com o uso de caminhão rodotrem, seriam necessários 105 veículos e condutores e 142 veículos e condutores no caso de bitrem, enquanto o comboio de 7,500 toneladas seria tripulado por apenas 5 pessoas. Isso reflete no potencial de redução na acidentalidade nas rodovias deste trecho, onde o Brasil ocupa a trágica posição de terceiro lugar em mortes no trânsito.

De forma geral, o modal rodoviário é o maior emissor de gases de efeito estufa no setor de transportes, quando confrontado com os modais ferroviário e hidroviário. Entretanto, o Brasil tem menos ferrovias que o México, a Argentina ou mesmo a China. Além de emitirem menos gases de efeito estufa, os trens são alternativas mais econômicas, seguras e eficientes que os caminhões. Segundo Bradesco (2017), o custo médio do transporte de carga rodoviário é de R\$ 40,00 para cada 1,000 ton/km, enquanto que o custo do modo ferroviário é de R\$ 20,50 para cada 1,000 ton/km, sendo, portanto, o transporte por ferrovias 50% mais econômico que o feito por caminhões. Para fins de comparação neste estudo de caso, a estimativa do custo do transporte rodoviário seria R\$ 187,072 e do transporte ferroviário R\$ 111,499.5, uma diferença de R\$ 75,572.5. Doutro modo, mesmo que o trecho ferroviário seja 103 km mais extenso, o custo do transporte ferroviário é 40% mais barato que o rodoviário.

Conclui-se, portanto, que o potencial de redução máxima de emissão de dióxido de carbono por ferrovias foi estimado em 37% em relação a rodovias, muito próximo ao valor médio determinado por estudo similar realizado pela VLI - 38% (SIMEFRE, 2013). Além disso, verifica-se a redução média de 40% dos custos de transporte por ferrovias em detrimento do transporte rodoviário. Corroborando com a hipótese de que o transporte ferroviário

possui maior sustentabilidade energética e econômica, e que portanto, carece de políticas de investimento para este importante modo de transporte.

Os resultados são de grande préstimo para orientar estudos aprofundados e discussões voltadas ao desenvolvimento regional, se desdobrando em benefícios à sociedade. O estudo também contribui para a aproximação entre a academia e as demandas do mercado, fortalecendo grupos de pesquisa e atividades voltadas à sustentabilidade nos transportes. Além disso, o trabalho também apresenta contributos para a técnica, evidenciando procedimento adequado e viável para o inventário de emissões de CO<sub>2</sub>.

#### Agradecimentos

Registramos nosso agradecimento à presteza e disponibilização de dados por parte da VLI e CASEMG (Companhia de Armazéns e Silos do Estado de Minas Gerais).

#### Referências

1. ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2016). *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis*. Acesso em 05 de junho de 2018, disponível em: [http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/Anuario\\_Estatistico\\_ANP\\_2016.pdf](http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/Anuario_Estatistico_ANP_2016.pdf)
2. ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres (2012). *1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Transporte Ferroviário de Cargas – Relatório Final*. Acesso em 06 de agosto de 2017, disponível em: [http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/inventario\\_ferrovuario\\_2012\\_final.pdf](http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/inventario_ferrovuario_2012_final.pdf)
3. Belia, V.; Bidone, E. D. (1993). *Rodovias recursos naturais e meio ambiente*, EDUFF – Editora Universitária Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil, 360 pp.
4. Booz Allen Hamilton Inc. (1991). *Locomotive emission study*, California Air Resources Board, Sacramento.
5. Bradesco, Banco Bradesco - Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos (2017) *TRANSPORTE FERROVIÁRIO, Junho de 2017*. Acesso em 05 de junho de 2018, disponível em: [https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset\\_transporte\\_ferrovuario.pdf](https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_transporte_ferrovuario.pdf)
6. Cazzola, P. (2013). *Evaluating CO<sub>2</sub> emissions in inland transport and climate change mitigation*. Acesso em 20 de agosto de 2017, disponível em: [http://www.unescap.org/sites/default/files/3.ECE\\_ForFITS\\_Model.pdf](http://www.unescap.org/sites/default/files/3.ECE_ForFITS_Model.pdf)
7. CODESP. Companhia Docas do Estado de São Paulo. *Resumo das movimentações de carga no Porto de Santos*, Acesso em 03 de novembro de 2016, disponível em: <http://www.portodesantos.com.br/imprensa.php?pagina=resano>
8. Gould, G. M.; Niemeier, D. A. (2011). Spatial assignment of emissions using a new locomotive emissions model, *Environmental Science & Technology*, 45(13), 46-52.
9. EPE. Empresa de Pesquisa Energética (2018) *Plano Decenal de Expansão de Energia 2027*. Acesso em 21 de fevereiro de 2020, disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2027>
10. IEA. International Energy Statistics (2012). *Railway Handbook 2012: Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions*, Acesso em 16 de agosto de 2019, disponível em: [https://www.uic.org/com/IMG/pdf/iea-uic\\_2012final-lr.pdf](https://www.uic.org/com/IMG/pdf/iea-uic_2012final-lr.pdf)
11. IEA. International Energy Statistics (2014). *CO<sub>2</sub> Emissions*. Acesso em 02 de agosto de 2017, disponível em: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=90&pid=44&aid=8&cid=regions,&syid=2007&eyid=2011&unit=MMTCD>
12. IPCC. INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2007). *Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima*. Acesso em 10 de dezembro de 2016, disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/portuguese/ar4-wg1-spm.pdf>
13. IPCC. INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2014). *Task Force on National Greenhouse Gas Inventories*. Acesso em 15 de dezembro de 2016, disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>
14. Lacerda, S. M. (2005). Logística Ferroviária do Porto de Santos: A Integração Operacional da Infra-Estrutura Compartilhada. *Revista do BNDES, RIO DE JANEIRO*, 2(24), 189-210.
15. MME, Ministério de Minas e Energia (2010). *Balanço Energético Nacional Ano Base 2009: Composição Setorial do Consumo de Derivados de Petróleo*. Acesso em 20 de outubro de 2016, disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1143895/2.1+-+BEN+2015+->

- +Documento+Completo+em+Português+-+Inglês+%28PDF%29/22602d8c-a366-4d16-a15f-f29933e816ff?version=1.0
16. MMA, Ministério de Meio Ambiente (2011). *1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*. Acesso em 13 de novembro de 2016, disponível em: [http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/C1CB3034/1o\\_Inventario\\_Nacional\\_de\\_Emissoes\\_Atmosfericas\\_por\\_Veiculos\\_Automotores\\_Rodoviarios.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/C1CB3034/1o_Inventario_Nacional_de_Emissoes_Atmosfericas_por_Veiculos_Automotores_Rodoviarios.pdf)
  17. OECD/FAO. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (2015). *Perspectivas Agrícolas 2015-2024*. Acesso em 25 de novembro de 2016, disponível em: <https://www.fao.org.br/download/PA20142015CB.pdf>
  18. OECD/FAO. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (2019). *Perspectivas Agrícolas 2019-2028*. Acesso em 21 de fevereiro de 2020, disponível em: <https://http://www.fao.org/3/ca4076es/CA4076ES.pdf>
  19. PBMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (2012). *Sumário Executivo – Primeiro Relatório de Avaliação Nacional*. Acesso em 25 de novembro de 2016, disponível em: [http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/sumario-executivo-web-16-7\\_OLD.pdf](http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/sumario-executivo-web-16-7_OLD.pdf)
  20. Silva, R. J. M.; Andrade, P. F. L.; Bartholomeu, D. B.; Cunha, C. B. (2014). Potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa através de intermodalidade no transporte de soja, em *Anais do XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, XXVIII ANPET, 24 a 28 de novembro de 2014, Curitiba, Brasil.
  21. Silva, R. J. M. (2015). *Metodologia de avaliação de emissões de dióxido de carbono no transporte intermodal: um estudo de caso da soja de exportação brasileira*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Sistemas Logísticos, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 197 pp.
  22. SIMEFRE, Sindicato Interestadual da Indústria de Materiais e Equipamentos Ferroviários e Rodoviários (2013). Transporte ferroviário reduz emissão de CO<sub>2</sub>. In *Série Estudos Ferroviário 2013 – Um olhar multimodal*. Acesso em 20 de agosto de 2017, disponível em: <http://www.shreditorial.com.br/digital/ferroviario/2013/files/assets/basic-html/index.html#4>
  23. USEPA, U. S. Environmental Protection Agency (2009). Emissions Factors Program Improvements. Acesso em 16 de agosto de 2019, disponível em: <https://www.regulations.gov/document?D=EPA-HQ-OAR-2009-0174-0001>
  24. Vilaça, R. (2011). O rumo e os números do setor de transporte ferroviário, em *Anais da 12ª Reunião da Câmara Setorial da Cadeia Produtiva da Soja*, 22 de março de 2011, Brasília, Brasil.
  25. Waldron, C. D.; Harnisch, J.; Lucon, O. (2006). Mobile Combustion. In K. Eggleston, Simon; Buendia, Leandro; Miwa, Kyoko; Tanabe (Eds.), *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. v. 2, p.1–78. Acesso em 16 de agosto de 2019, disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_3\\_Ch3\\_Mobile\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf)