



The Journal of Transport Literature

www.journal-of-transport-literature.org



Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO₂ no transporte rodoviário de cargas

Daniela Bacchi Bartholomeu⁺; Thiago Guilherme Péra; José Vicente Caixeta-Filho

Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ)/Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, Brasil

Article Info

Palavras-chave:
emissões de CO₂
gases de efeito estufa - GEE
transporte rodoviário de
carga
consumo de combustível
biodiesel

Submitted 21 May 2015;
received in revised form 1 Jul 2015;
accepted 12 Jul 2015.

Licensed under
Creative Commons
CC-BY 3.0 BR.

Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar e quantificar o potencial de mitigação de CO₂ no transporte rodoviário de cargas decorrente da adoção de medidas e tecnologias voltadas para promover (a) a redução do consumo de combustível, bem como (b) a substituição gradativa do diesel pelo biodiesel. Em cada caso, foi estimada a emissão do cenário base e, em seguida, foram feitas simulações que permitiram construir a curva de emissão em função de avanços tecnológicos voltados para aumentar a eficiência energética ou substituir diesel por biodiesel. Os principais parâmetros utilizados para mensurar as emissões dizem respeito à distância percorrida, quantidade de carga transportada e consumo de combustível. Foram coletados dados primários junto a diversas transportadoras, compondo uma amostra de 145 veículos. Os principais resultados indicam que um aumento de 0,5 km/l na eficiência energética da frota leva a uma redução de cerca de 20% nas emissões de GEE. Entretanto, o potencial de mitigação das emissões através do aumento do teor de biodiesel não é tão promissor, devido, em grande parte, à queda do rendimento do veículo e consequente aumento do consumo. Neste sentido, os resultados apontam que esforços que busquem reduzir consumo de combustível da frota podem contribuir de forma mais efetiva para redução das emissões de GEE que a substituição de percentuais cada vez maiores de diesel por biodiesel.

⁺ Corresponding author. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11 (Antiga Colônia Sertãozinho). CEP 13418-900 - Piracicaba – SP.
E-mail address: daniela.bartholomeu@usp.br.

Introdução

Estimar a redução das emissões a partir de uma melhor gestão logística é extremamente difícil (IEA/OECD, 2001). Entretanto, é possível adotar iniciativas a partir de uma série de possibilidades que vêm sendo desenvolvidas ou que já estão disponíveis no mercado, com vistas a reduzir as emissões. O mais interessante é que as opções consideradas acabam trazendo benefícios econômicos, ao aumentar a eficiência e a produtividade do transporte, reduzir a dependência energética e o consumo relativo de combustível. Muitas destas medidas também apresentam impactos positivos sobre a segurança das viagens, reduzindo o risco de acidentes.

IEA/OECD (2009) indicam que, através de melhores tecnologias, tais como motores avançados, redução do peso dos implementos, melhoria na aerodinâmica e nos pneus, novos caminhões podem se tornar pelo menos entre 30% e 40% mais eficientes até 2030.

Sistemas logísticos de informação que contribuam para um uso mais eficiente dos veículos, assim como mudanças para veículos com maior capacidade, em alguns casos podem gerar ganhos adicionais de eficiência para o sistema de transporte. Além de tecnologias mais avançadas e estratégias de otimização de fluxos e uso da capacidade, é fundamental a participação de motoristas e transportadoras para potencializar a redução do consumo de combustível. Está clara a importância de motoristas bem treinados e da definição de metas ou indicadores para ganhos de eficiência.

Este trabalho tem como objetivo geral estimar o potencial de mitigação das emissões de CO₂ no transporte rodoviário de cargas decorrentes de medidas que afetem o consumo de combustível. Especificamente, busca-se estimar a redução das emissões através da adoção de medidas e tecnologias que (a) aumentem a eficiência energética dos veículos, expressa pelo aumento da relação “quilometragem percorrida/litro de combustível” e (b) promovam a substituição de combustível, através de um aumento progressivo da mistura do biodiesel no diesel. Busca-se também construir a curva de emissão para cada caso analisado, de modo a identificar qual alternativa possui uma taxa de resposta mais representativa em termos de redução da emissão em função de mudanças no padrão tecnológico.

Uma série de estratégias pode ser adotada com o intuito de aumentar a eficiência do transporte através da redução do consumo de combustível. Neste trabalho, tais estratégias foram agrupadas em ações (a) que permitem observar aumento da eficiência na direção (“eco-driving”), tais como manutenções preventivas e treinamentos de motoristas; (b) que envolvem sistemas de gestão, tais como tecnologias “on-board”, gestão de fluxos e movimentação (como sistemas de roteirização e otimização), gestão da capacidade de transporte, renovação da frota; e (c) que dizem respeito a novas tecnologias em veículos e acessórios, tais como redução no peso do veículo, melhoria na aerodinâmica do caminhão, melhoria na eficiência do motor, e redução na resistência dos pneus. Obviamente, tais grupos não esgotam as possibilidades existentes, mas abrangem grande parte das ações possíveis dado o estado da tecnologia atual.

A substituição de combustível também é apontada como uma alternativa para mitigar as emissões de GEE do transporte. Dentre os combustíveis apontados como menos carbono-intensivos, o biodiesel ganhou destaque no setor de transporte de cargas nos últimos anos, sendo incluído tanto na agenda pública quanto privada. O Programa Nacional do Biodiesel estabelece o aumento progressivo do percentual do biodiesel no diesel, constituindo, portanto, um norteador em termos de tecnologia a ser adotada pelas empresas de transporte nos próximos anos. Além disso, este combustível alternativo foi escolhido uma vez que, no caso do transporte de cargas, representa uma das tecnologias mais adiantadas em termos de desenvolvimento e testes de laboratório.

Existe uma série de estudos relacionados à utilização de biodiesel, em diferentes proporções junto ao diesel (B5, B20, B80, B100), buscando avaliar os impactos na eficiência do transporte (níveis de consumo), na manutenção do equipamento (estabilidade, corrosividade, formação de biodepósitos etc.) e no meio ambiente (emissões de gases). Entretanto, os estudos ainda não apontaram, de forma clara, quais seriam estes resultados. Isso ocorre devido às diferenças de metodologias de testes, de matéria-primas utilizadas e das condições de simulação.

De qualquer forma, cabe destacar os resultados de uma pesquisa realizada pela CNT em 2009, buscando avaliar a percepção das empresas em relação aos impactos das mudanças físicas ocorridas devido à adição de 4% do biodiesel no diesel comum. Segundo a pesquisa, 23% das empresas declararam ter observado aumento do consumo de combustível após o início da adição. Além disso, 21% das empresas identificaram problemas nos motores, dentre os quais se destacam o aumento da troca de filtro de combustível e dos resíduos em bicos injetores e válvulas. A CNT recomenda uma limpeza nos tanques dos veículos antigos (cuja tecnologia não contempla os avanços existentes nos atuais), para que o novo combustível não traga inconvenientes à empresa.

2. Metodologia

Para realizar os cálculos das emissões e as estimativas do potencial de mitigação, foi adotada a Metodologia de linha de base e monitoramento aprovada pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) denominada "AM0090 - Modal shift in transportation of cargo from road transportation to water or rail transportation".

Apesar de a metodologia ser aplicada, no caso da elaboração de projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), para atividades que envolvam a mudança do transporte de cargas do modal rodoviário para o ferroviário ou aquaviário, ela foi adaptada e adotada como base para os cálculos das emissões de CO₂ neste estudo.

Os procedimentos metodológicos são apresentados a seguir. Os dados necessários para a realização do estudo foram coletados junto a algumas transportadoras de carga.

2.1. Estimativa das emissões de GEE

A metodologia adotada preocupa-se com o cálculo do CO₂, principal fonte de emissão dos transportes. Outros gases de efeito estufa, como CH₄ e N₂O são desconsiderados, uma vez que são inexpressivos (UNFCCC, 2010). Para as estimativas de emissão de GEE no modal rodoviário, a mesma metodologia sugere a seguinte sequência de cálculo:

2.1.1. Estimativa de Emissões de Linha de Base

$$BE_y = T_y \cdot AD \cdot EF_{BL} \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

Onde:

BE_y = Emissões de linha de base no ano y (tCO₂);

T_y = quantidade de carga transportada pelo modal de transporte rodoviário no ano y (toneladas);

AD = Distância percorrida (km);

EF_{BL} = Fator de emissão de linha de base para o transporte de carga (g CO₂/t.km).

2.1.2. Estimativa do Fator de Emissão da Linha de Base

$$EF_{BL} = \frac{\sum_i FC_{BL,i,y} \cdot NCV_{i,y} \cdot EF_{CO_2,i,y} \cdot F_{RT,BL}}{T_y \cdot AD} \quad (2)$$

Onde:

EF_{BL} = Fator de emissão de linha de base para o transporte de carga (g CO₂/t.km);

FC_{BL,i,y} = Quantidade do combustível i consumido pelos caminhões no ano y (litros ou m³);

EFCO_{2,i,y} = Fator de Emissão de CO₂ do combustível i consumido pelos caminhões no ano y (g CO₂/G);

NCV_{i,y} = Valor do poder calorífico médio do combustível i consumido pelos caminhões no ano y (GJ por litro ou m³);

F_{RT,BL} = Fator para viagens de retorno não-vazias no cenário de linha de base (fração);

T_y = Quantidade de carga transportada pelo modal de transporte rodoviário no ano y (toneladas);

AD = Distância percorrida (km).

Observação: se o combustível é misturado com bicombustível, o fator de emissão da mistura (%) deve ser calculado assumindo um fator de emissão igual a zero para o bicombustível.

2.1.3. Fator para viagens de retornos não-vazias no cenário linha de base

$$F_{RT,BL} = \frac{T_y \cdot AD}{T_y \cdot AD + T_{RT,y} \cdot RTD_y} \quad (3)$$

Onde:

F_{RT,BL} = Fator para viagens de retorno não-vazias no cenário de linha de base (fração);

T_y = Quantidade de carga transportada pelo modal de transporte rodoviário no ano y (toneladas);

AD = Distância percorrida (km);

T_{RT,y} = Quantidade de carga transportada em caminhões em viagem de retorno no ano y (toneladas);

RTD_y = Distância percorrida em viagens de retorno no ano y (km).

2.2. Pesquisa e Coleta de dados primários

Foi feito um levantamento de dados primários junto a uma série de transportadoras de carga líquida a granel, totalizando uma amostra de 145 veículos. Os dados coletados, considerando o ano base de 2009, dizem respeito a:

- Quantidade de carga transportada pelo modal de transporte rodoviário no ano (t);
- Distância percorrida no ano (km);
- Quantidade de diesel consumido pelos caminhões no ano (litros);
- Quantidade de carga transportada em caminhões em viagem de retorno no ano (t); e
- Distância percorrida em viagens de retorno no ano (km).

Informações sobre os fatores de emissão do diesel e do biodiesel foram obtidas a partir da literatura. A Tabela 1 sumariza os dados utilizados nas estimativas de emissão.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros utilizados no modelo.
Fonte: Resultados da pesquisa, a partir de levantamento de dados primários e secundários.

Parâmetro	Valor Assumido/detalhe	Fonte
Distância (km)	52.103.110	Informado pelas transportadoras
Quantidade transportada (t)	1.404.192.095	Informado pelas transportadoras
Consumo médio (km/l)	2,135	Obtido a partir da média do consumo informado pelas transportadoras
Viagem de retorno	1	Não há viagem de retorno (informado pelas transportadoras)
Fator de Emissão do diesel (gCO ₂ /litro)	2.750	Bartholomeu e Caixeta-Filho (2009)
Fator de Emissão do biodiesel (gCO ₂ /litro)	2.499,06	GHG Protocol

Além disso, também foram considerados, para efeitos de cálculos, os parâmetros para os veículos de carga descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização dos caminhões amostrados.
Fonte: Resultados da pesquisa.

Cavalo	Potência (cv)	Capacidade (litros)	Composição	Capacidade (litros)	Capacidade Total* (litros)
Toco	300-320	12.000	Reboque	-	8.000 - 20.000
Trucado 6x4	300-320	9.000	Reboque	15.000	24.000
Trucado	350-440	-	Bitrem	-	36.000-42.000

* Importante destacar que a capacidade varia segundo a densidade do produto transportado.

3. Resultados e Discussão

A partir do modelo e dos parâmetros descritos na seção anterior, foram estimadas as emissões de linha de base, ou seja, as emissões médias observadas no ano base da pesquisa, a partir dos dados informados pelas transportadoras contatadas. Num segundo momento, foram feitas simulações de forma a extrapolar os resultados do cenário base. Esta extrapolação buscou estimar o potencial de mitigação das emissões resultante de variações no cenário de linha de base, em função da adoção de medidas que (a) aumentem a eficiência energética dos veículos, expressa pelo aumento da relação “quilometragem percorrida/litro de combustível” e (b) promovam a substituição de combustível, através de um aumento progressivo da mistura do biodiesel no diesel. Com isso, foi possível construir a curva de emissão, indicando a sensibilidade de resposta de mitigação em função de aumento na eficiência energética ou no teor do biodiesel no diesel.

Inicialmente são apresentados os resultados de incrementos na eficiência energética do veículo, isto é, de redução do consumo de combustível ou aumento do rendimento do veículo. A Figura 1 ilustra os resultados obtidos, indicando que reduções no consumo médio de combustível levam a reduções tanto das emissões totais quanto das emissões por tonelada transportada.

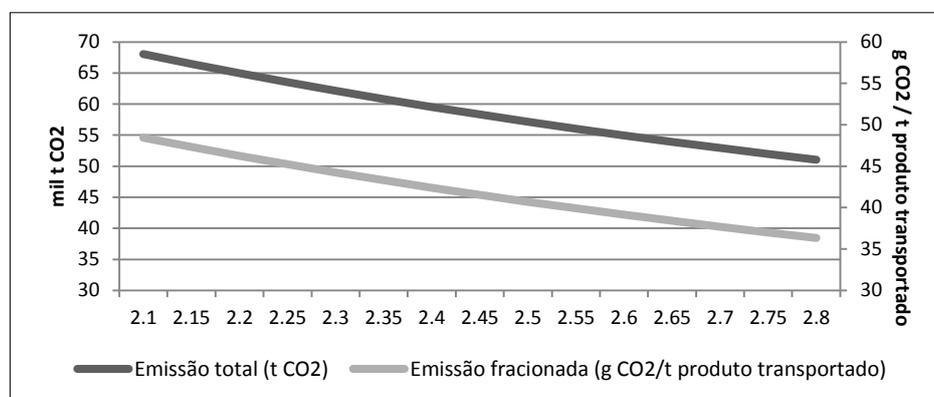


Figura 1 – Curva de emissão de CO₂ em função da variação do consumo médio de combustível (km/l).
Fonte: Resultados da pesquisa.

Em termos quantitativos, um incremento de 10% na eficiência energética da frota rodoviária estudada em relação aos níveis médios atuais (2,135 km/l), resulta numa redução de 9,6% nas emissões de CO₂. Isso significa que se forem adotadas medidas que resultem numa redução no consumo médio de combustível da ordem de 0,5 km/l, por exemplo, as emissões de GEE resultantes devem cair 19,23%.

Neste sentido, diversas ações que possuem o objetivo de reduzir consumo de combustível resultam na redução da emissão de GEE, tais como as citadas na Tabela 3 e discutidas anteriormente, na Introdução. Tais ações que visam à redução do consumo de combustível podem ser implementadas de imediato e/ou no curto-prazo, pois são medidas relativamente simples, disponíveis no mercado e com resultados já comprovados.

Tabela 3 – Grupo de ações visando à redução do consumo de combustível.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Grupo de Ação	Ação
Aumento da eficiência na direção	Manutenção preventiva Treinamento de motoristas e Operação ajustada ao veículo
Sistemas de gestão	Tecnologias “on-board” Sistemas de roteirização Gestão da capacidade de transporte Gestão da idade da frota / Renovação
Tecnologia em veículos e acessórios	Redução no peso do veículo Melhoria na aerodinâmica do caminhão Melhoria na eficiência do motor Redução na resistência dos pneus

Para os cálculos das estimativas de potencial de mitigação de emissão em função do aumento do teor de biodiesel no diesel, foi considerada como linha de base a mistura B3. A partir daí, foram feitas simulações para as estimativas das emissões de B5, B10, B20, B50, B80 e B100. Os resultados podem ser visualizados na Figura 2. Como esperado, conforme o percentual de biodiesel aumenta, as emissões (total e média) diminuem. Entretanto, a redução das emissões é pouco significativa frente ao esforço necessário para aumentar o teor do biodiesel no diesel.

Apenas cerca de 4% das emissões são mitigadas quando o teor do biodiesel aumenta de 3% para 50% no diesel. Mesmo utilizando biodiesel puro (B100), o potencial de mitigação corresponde a apenas 8,71% em relação à linha de base. Este resultado se deve, em grande parte, pelo aumento do consumo de combustível resultante do progressivo aumento do biodiesel na mistura com o diesel.

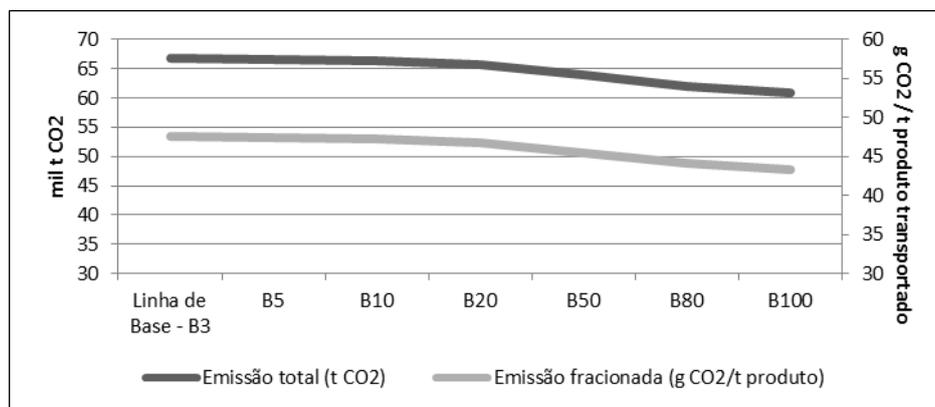


Figura 2 – Curva de emissão de CO₂ em função da variação do teor de biodiesel na mistura Diesel-Biodiesel.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Conclusões

O objetivo do trabalho foi estimar o potencial de mitigação das emissões de CO₂ no transporte rodoviário de cargas decorrentes da adoção de medidas e tecnologias que (a) reduzam o consumo de combustível, e (b) promovam a substituição de combustível, através de um aumento progressivo da mistura do biodiesel no diesel. Tal objetivo foi atingido sob uma ótica de avaliação de diferentes cenários de eficiência energética e de utilização do biodiesel, com uma abordagem metodológica referencial. A avaliação destes cenários permitiu a construção da curva de emissão para cada caso analisado, de modo a identificar qual alternativa possui uma taxa de resposta mais representativa em termos de redução da emissão em função de mudanças no padrão tecnológico.

Os principais parâmetros utilizados para mensurar as emissões (tais como a distância percorrida, a quantidade de carga transportada e o consumo de combustível) foram obtidos junto a diversas transportadoras, compondo uma amostra de 145 veículos.

Em geral, os resultados indicaram que, de fato, há ganhos ambientais decorrentes da utilização de tecnologias que possibilitem aumento da eficiência do consumo de combustível na frota de veículos, bem como o incremento do biodiesel como combustível padrão. No entanto, a taxa de resposta do potencial de mitigação das emissões em função das mudanças nas tecnologias é bastante diferente entre as alternativas analisadas.

Assim, por exemplo, um incremento de 10% na eficiência energética da frota rodoviária estudada em relação aos níveis médios atuais (2,135 km/l), resulta numa redução de 9,6% nas emissões de CO₂. Isso significa que se forem adotadas

medidas que resultem numa redução no consumo médio de combustível da ordem de 0,5 km/l, por exemplo, as emissões de GEE resultantes devem cair 19,23%.

Por outro lado, o potencial de mitigação das emissões através do aumento do teor de biodiesel não é tão promissor, devido, em grande parte, à queda do rendimento do veículo e consequente aumento do consumo. Foi verificado que apenas cerca de 4% das emissões são mitigadas quando o teor do biodiesel aumenta de 3% para 50% no diesel (ou seja, passa-se de B3 para B50). Mesmo utilizando biodiesel puro (B100), o potencial de mitigação corresponde a apenas 8,71% em relação à linha de base.

Neste sentido, os resultados apontam que esforços e investimentos que busquem reduzir consumo de combustível da frota podem contribuir de forma mais efetiva para redução das emissões de GEE que a substituição de percentuais cada vez maiores de diesel por biodiesel. As medidas potenciais para reduzir o consumo podem ser implementadas a partir de investimentos da indústria fabricante de caminhões direcionados ao desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aumento da eficiência dos veículos (tais como tecnologias "on-board", redução no peso do veículo, melhoria na eficiência do motor, redução da resistência ao rolamento, por exemplo) e também pelos gestores de frotas, através da inserção de sistemas de gestão, adoção de manutenção preventiva ou realização de treinamentos de motoristas). Particularmente para o caso do biodiesel, novas tecnologias devem ser incorporadas para que possibilitem uma redução efetiva do consumo de combustível. Caso contrário, o enorme esforço que vem sendo despendido em favor dos benefícios ambientais esperados do biodiesel, considerado um combustível limpo e renovável, acabará sendo questionado.

Referências Bibliográficas

- Bartholomeu, D.B.; Caixeta-filho, J.V. (2009). Quantification of the environmental impacts of road conditions in Brazil. *Ecological Economics*, 68 (2009) 1778-1786.
- BRASIL. Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel - PNPB. Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br>. Acesso em: ago.2010.
- CNT; SEST/SENAT. A adição do biodiesel e a qualidade do diesel no Brasil. Despoluir: Programa Ambiental do Transporte. s/d.
- Delucchi, M.A. (2003). A Lifecycle Emissions Model (LEM): Lifecycle emissions from transportation fuels, motor vehicles, transportation modes, electricity use, heating and cooking fuels, and materials. Documentation of Methods and Data. UCT-ITS-RR-03-17 Main Report, Institute of Transportation Studies, University of California Davis.
- Delucchi, M.A. (2006). Lifecycle analyses of biofuels. Draft manuscript. Institute of Transportation Studies. University of California, Davis.
- Hill, J.; Nelson, E.; Tilman, D.; Polasij, S.; Toffany, D. (2006). Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of América - PNAS*. vol. 103; no. 30.
- IEA - International Energy Agency (2010). Transport Energy Efficiency: Implementation of IEA Recommendations since 2009 and next steps.
- IEA - International Energy Agency; OECD - Organization for Economic Co-operation and Development (2001). Saving Oil and Reducing CO2 Emissions in Transport: Options and Strategies.
- IEA - International Energy Agency; OECD - Organization for Economic Co-operation and Development (2009). Transport, energy and CO2: moving toward sustainability. Executive summary.
- Oliveira, L.B.; COSTA, A.O. Biodiesel: Uma experiência de Desenvolvimento sustentável. IVIG/COPPE/UFRJ. Disponível em: http://www.ivig.coppe.ufrj.br/pbr/proj_biodiesel.htm.
- Santos, D.C.; Peixoto, L.B.; Torres, E.A. (2007). Análise de Emissões e de Consumo Específico de um Motor Diesel Operando com Biodiesel de Soja e de Óleos e Gorduras Residuais. 2º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel.
- Teles, F.; Mangueira, D.S.; Mundim, A. (2006). Análise de gases e opacidade em frota cativa utilizando Biodiesel B20. 1º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel.
- UNFCCC. (2010) AM0090 - Modal shift in transportation of cargo from road transportation to water or rail transportation. Versão 01.

Abstract (only for articles in Portuguese and Spanish)

This study aims to assess and quantify the potential for CO2 mitigation in the road freight transportation resulting from the adoption of technologies for promoting (a) the reduction of fuel consumption and (b) the gradual replacement of diesel by biodiesel. In both cases, the baseline emission was estimated. In sequence, it were performed simulations that allowed to build the emission curve as a function of technological advances aimed to increasing energy efficiency or replacing diesel by biodiesel. The main parameters used to measure emissions were the distance traveled, the quantity of cargo transported, and the fuel consumption. Primary data were collected from carriers, comprising a sample of 145 vehicles. The main results indicate that an increase of 0.5 km/l in the fleet efficiency reduces about 20% the GHG emissions. However, the potential for mitigation through increased biodiesel content is not so promising, especially due to a poorer vehicle performance and, as a consequence, an increase in consumption. In this context, the results indicate that efforts seeking to reduce fuel consumption of heavy-duty fleet can contribute more effectively to reduce GHG emissions that replacing diesel by biodiesel.

Key words: CO2 emission, greenhouse gases - GHG, road freight transportation, fuel consumption, biodiesel.