

EMISSÕES DE CO₂ NO BRASIL E AS MUDANÇAS NA LEGISLAÇÃO DO BIODIESEL

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as alterações climáticas tem dado origem a discussões detalhadas e substanciais sobre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em todo o mundo. No caso brasileiro, o cenário não foi diferente, se destacado os fatores comportamentais e regulamentadores que surgiram do debate desta questão. A simples questão é saber se as mudanças na regulação no Brasil, tiveram algum impacto mensurável no padrão das emissões de dióxido de carbono (CO₂), que é um dos principais gases causadores do efeito estufa, ou seja, a regulação mudou ou se adaptou antes que os padrões mudassem. Esta pesquisa buscou explorar a questão de como ocorreu a evolução da regulação ambiental com relação ao consumo de combustível no setor de transporte e se as alterações impactaram na redução das emissões de CO₂.

O biodiesel é um tipo de combustível degradável produzido a partir de fontes renováveis, como óleos vegetais "puros" ou usados e gorduras animais. Ele é fabricado através de vários processos, incluindo craqueamento, esterificação e transesterificação. Pode ser usado sozinho ou misturado com o óleo diesel convencional em diferentes proporções. Quando é uma mistura dos dois tipos de óleo, é denominado pelo percentual de biodiesel que contém, como B2 (com 2% de biodiesel), B20 (com 20%) e assim por diante até o B100, que é puro biodiesel (Silva e Freitas, 2008).

Muitos estudos tem se dedicado a estudar a relação entre fontes alternativas aos combustíveis fósseis, mais especificamente os biocombustíveis, e a mitigação as questões ambientais. É relevante mencionar os estudos de Searchinger et al. (2008), Börjesson (2009), Kim, Kim e Dale (2009), Lapola (2010) e Timilsina e Mevel (2011), que investigaram o uso de biocombustíveis e sua relação com as mudanças climáticas e as alterações no uso da terra. Também são importantes as pesquisas de Fearnside (1995), que abordou as emissões associadas ao uso de florestas e ao desmatamento. Os trabalhos de Goldemberg (2007), Macedo et al. (2008), Rocha e Carrilho (2008), Reijnders e Huijbregts (2008), Gnansounou et al. (2009), Galdos et al. (2013) e Perin et al. (2015) são relevantes para análises sobre biocombustíveis, focando nos impactos ambientais e na substituição dos combustíveis fósseis.

Dessa forma, pode-se destacar a necessidade de práticas agrícolas mais sustentáveis para uma redução das emissões de GEE (Overmars et al., 2011) e também a importância dos biocombustíveis como fonte alternativa de energia renovável, sendo que o biodiesel representa uma alternativa viável ao óleo diesel tradicional, proveniente de fontes renováveis como soja, dendê, mamona, algodão, girassol, sebo bovino, entre outros. Suas características físico-químicas e reológicas são comparáveis às do óleo diesel, tornando-o adequado para uso em motores convencionais (Esteves e Pereira, 2016).

Conforme Viana (2008) observou, uma das principais vantagens do biodiesel é sua capacidade de ser empregado diretamente em motores a diesel, resultando em uma combustão mais limpa em comparação com o óleo diesel convencional de origem fóssil.

Mesmo havendo um esforço na literatura para elucidar a relação entre o consumo de biodiesel e a redução de emissões de GEE, não encontrou-se até a elaboração da presente pesquisa, estudo que buscou analisar como as mudanças na regulação do biocombustível está relacionada as emissões de GEE, levando em consideração os estados brasileiros e unidade federativa, sendo assim uma contribuição nova para a literatura existente.

Portanto, o objetivo do presente estudo é avaliar se a introdução do biodiesel e as mudanças na regulação impactaram em mudanças no nível de emissões de CO₂ oriundo da queima de combustíveis no setor de transporte.

Espera-se que o uso de biodiesel tenha trazido benefícios para a redução do nível proporcional de emissões de CO₂, assim como o aumento da proporção de biodiesel no diesel convencional devido as mudanças na regulação trouxeram ganhos adicionais na redução. Dessa forma, pode-se definir como problema de pesquisa o seguinte questionamento: O uso de biodiesel no setor de transportes impactou a redução de emissões de CO₂ nos estados brasileiros?

Para responder ao problema de pesquisa, utilizou-se o ferramental metodológico de dados em painel, para avaliar os níveis de emissões de CO₂ nos estados do Brasil e Distrito Federal (DF) ao longo dos anos de 1990 a 2022, avaliando a introdução do biodiesel e as mudanças na regulação durante o período de estudo.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 Estratégia Empírica

Após a implementação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), tornou-se evidente que a combustão do biodiesel em motores a diesel resulta em uma significativa redução na emissão de gases poluentes, incluindo material particulado, óxidos de enxofre, hidrocarbonetos e monóxido de carbono. Adicionalmente, estudos têm demonstrado que o biodiesel atua como um excelente lubrificante, potencialmente aumentando a vida útil do motor (Esteves e Pereira, 2016).

A regulação brasileira define biodiesel como um combustível constituído de monoalquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais designado B100, de acordo com a Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) nº 968, de 30 de abril de 2024, estabelece as especificações e os métodos para determinar as características do biodiesel nacional ou importado destinado à comercialização no território nacional. Esse biocombustível pode ser utilizado puro ou em mistura com óleo diesel em concentrações específicas. A nomenclatura mundialmente adotada para identificar a concentração do biodiesel em uma mistura é definida como BXX, onde XX representa a porcentagem em volume do biodiesel na mistura. Por exemplo, o B2, B5, B20 e B100 correspondem a combustíveis com concentrações de 2%, 5%, 20% e 100% de biodiesel, respectivamente (Esteves e Pereira, 2016).

A mistura do biodiesel com o diesel fóssil teve seu início em 2004, inicialmente como uma medida experimental. Entre os anos de 2005 e 2007, a comercialização voluntária com uma concentração de 2% foi adotada. A obrigatoriedade da mistura foi estabelecida pelo artigo 2º da Lei nº 11.097/2005, que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira. Em janeiro de 2008, entrou em vigor a mistura legalmente obrigatória de 2% (B2) em todo o território nacional. Com o desenvolvimento do mercado brasileiro e a maturidade do setor, esse percentual foi gradualmente aumentado pelo Conselho Nacional de Política Energética - CNPE (ANP, 2024).

Com o amadurecimento do mercado brasileiro, esse percentual foi sucessivamente ampliado pelo CNPE (B2 até junho de 2008; B3 de julho de 2008 até junho de 2009; B4 de julho de 2009 até dezembro de 2009; B5 de janeiro de 2010 até junho de 2014; B6 de julho de 2014 até outubro de 2014; B7 de novembro de 2014 até fevereiro de 2017; B8 de março de 2017 até fevereiro de 2018; B10 de março de 2018 até agosto de 2019; B11 de setembro de 2019 até fevereiro de 2020; B12 de março de 2020 até agosto de 2020; B10 de setembro de 2020 até outubro de 2020; B11 de novembro de 2020 até dezembro de 2020; B12 de janeiro de 2021 até fevereiro de 2021). Em março de 2021, a mistura foi ampliada para 13% - B13 (Resolução CNPE nº 16/2018). Em maio de 2021, foi reduzida a 10% - B10 (Resoluções CNPE nº 4 e 10/2021). Em setembro, foi aumentada para 12% - B12 (Resolução CNPE nº 11/2021). Em novembro, foi reduzida para 10% novamente (Resolução CNPE nº 14 e 25/2021 e 12/2022).

Em abril de 2023, a mistura de biodiesel no diesel foi ampliada de 10% para 12% (Resolução CNPE nº 3/2023). E em março de 2024, a mistura subiu de 12% para 14% - B14 (Resolução CNPE nº 8/2023) (ANP, 2024).

A partir de 1º de abril de 2024, o óleo diesel vendido em todo o Brasil passou a conter 14% de biodiesel (B14). Essa determinação foi estabelecida pelo CNPE, que aumentou para 14% o percentual obrigatório de mistura de biodiesel ao óleo diesel. O contínuo aumento na proporção de biodiesel adicionado ao diesel reflete o êxito do PNPB, assim como a vasta experiência acumulada pelo Brasil na produção e no consumo em larga escala de biocombustíveis (ANP, 2024).

Considerando as repetidas alterações na regulação, a estratégia adotada pelo presente estudo para buscar identificar se as mudanças impactaram nas emissões de CO₂ no setor de transportes nos estados brasileiros e DF, foi utilizar os períodos de julho de 2008 até fevereiro de 2018 (misturas B3 até B8, ou seja, de 3% até 8%) e março de 2018 até dezembro de 2022 (misturas B10 até B12, ou seja, de 10% até 12%). A definição dos dois períodos se deve a mudanças na regulação mais disruptivas, em que a mudança de B8 para B10 representou o primeiro aumento superior a 1% como ocorria nas mudanças anteriores, sendo um aumento incremental importante, e o período final a mistura se manteve entre B10 e B12, até o final do período estudado. Adicionalmente buscou-se considerar também o período da pandemia de covid-19 para verificar possíveis mudanças comportamentais no uso de biodiesel nesse período.

Dessa forma, para estruturar o objeto de pesquisa, utiliza-se o ferramental econométrico de dados em painel (Wooldridge, 2010), que pode ser formalizado na seguinte função:

$$ECO2_{ij} = f(VD_{ij}; Population_{ij}; B_n) \quad (1)$$

Em que, ECO₂ é o nível de emissões (dióxido de carbono equivalente por tonelada); VD são as vendas de diesel em metros cúbicos (m³); População é a estimativa populacional; e B representa as mudanças na regulação; i refere-se ao ano; j indica o estado ou distrito federal; e, n indica o percentual (%) de biodiesel misturado ao diesel convencional de acordo com a regulação vigente.

Portanto, as emissões são descritas como função da venda (consumo) de diesel, população do estado e das mudanças na regulação. Visando formalizar a função (1) e estimar o modelo, considerou-se o tamanho da população como controle, sendo calculados os valores per capita (pc) para as variáveis de emissões ($ECO2pc_{ij} = ECO2_{ij}/População_{ij}$) e vendas de diesel ($VDpc_{ij} = VD_{ij}/População_{ij}$). Além disso, para obter as elasticidades diretas, aplica-se o logarítmo neperiano as duas variáveis. Para as informações de mudanças na regulação, foram criadas variáveis binárias para as misturas indicadas anteriormente, conforme os períodos de cada regulação ($B_3B_8 = 1$ se período é de 2008 até 2017 e zero caso contrário; $B_{10}B_{12} = 1$ se período é de 2018 até 2022 e zero caso contrário). Adicionalmente, foi utilizada uma variável dummy para o período da pandemia de covid-19 ($CV19 = 1$ se período for de 2020 até 2022 e zero caso contrário), conforme início e fim do período de análise, seguindo as declarações da Organização Mundial da Saúde (OMS).

Assim, formalmente temos:

$$\log ECO2pc_{ij} = \beta_1 + \beta_2 \log VDpc_{ij} + \beta_3 B_3 B_8 + \beta_4 B_{10} B_{12} + \beta_5 CV19 + u \quad (2)$$

Em que: $\log ECO2pc_{ij}$ é o logarítmo neperiano das emissões de CO₂ per capita para os estados *j* no período *i*; $\log VDpc_{ij}$ é o logarítmo neperiano das vendas de diesel per capita para os estados *j* no período *i*; B_3B_8 , $B_{10}B_{12}$ e $CV19$ são variáveis binárias, definidas de acordo com a mistura do biodiesel e período da pandemia, respectivamente. A partir da equação (2), foram estimados modelos de dados em painel (empilhados, efeitos fixos e aleatórios), seguindo a estrutura metodológica indicada por Wooldridge (2010), cujos resultados são apresentados na próxima seção.

2.2 Dados

Para realizar essa análise, foram utilizados dados das emissões de CO₂, vendas de óleo diesel e população anual por estado brasileiro, além da regulação ambiental ligada a implementação do biodiesel. A base de dados foi constituída para o período de 1990 até 2022, constituindo um painel de dados longitudinais, sendo o período definido em razão da disponibilidade limitada de dados.

Os dados das emissões de CO₂ se referem a emissões de gases de efeito estufa por CO₂e (t) (dióxido de carbono equivalente por tonelada) GWP-AR5 (Global Warming Potential – Fifth Assessment Report), referente a queima de combustíveis (Diesel e Biodiesel), oriundos do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).

As vendas de diesel referem-se as vendas estaduais em metros cúbicos de óleo diesel, constituídas a partir dos dados municipais disponibilizados pela ANP, a partir dos quais realizou-se a contabilização dos mesmos fazendo o somatório das vendas municipais de cada estado ao longo dos anos.

Adicionalmente, para o cálculo dos valores per capita, como forma de controle para o tamanho (densidade populacional) dos estados, foram utilizadas as estimativas da população com data de referência em 1º de julho de cada ano obtidas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), elaboradas pela Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Gerência de Estudos e Análises da Dinâmica Demográfica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, apresentamos os resultados das regressões que analisam a relação entre as emissões de CO₂ per capita (ECO₂pc) e as variáveis independentes, vendas de diesel per capita (VDpc) e a porcentagem de biodiesel aplicada anualmente (dummies B3_B8 e B10_B12), além da variável binária para o período pandêmico (CV19). Foram estimados três modelos de regressão, a saber: Pooled (dados empilhados), Efeito Fixo (EF) e Efeito Aleatório (EA) (Tabela 1).

Tabela 1. Resultados das regressões de emissões de CO₂

| | Variável Dependente: log(ECO ₂ pc) | | |
|-------------------------|---|----------------------|------------------------|
| | Pooled (1) | EF (2) | EA (3) |
| log(VDpc) | 1.048*** (0.010) | 1.012*** (0.021) | 1.021*** (0.019) |
| B3_B8 | -0.091*** (0.014) | -0.080*** (0.013) | -0.083*** (0.012) |
| B10_B12 | -0.155*** (0.026) | -0.144*** (0.021) | -0.147*** (0.021) |
| CV19 | -0.014 (0.032) | -0.012 (0.025) | -0.012 (0.025) |
| Constante | -6.141*** (0.054) | | -6.000*** (0.102) |
| Teste F (Chow) | 23.805*** | | |
| Teste de BP | | | 2262.4*** |
| Teste de Hausmann | | 0.82421 | |
| Observações | 891 | 891 | 891 |
| R ² | 0.924 | 0.763 | 0.795 |
| R ² Ajustado | 0.924 | 0.755 | 0.794 |
| F Statistic | 2,709.64*** | (df=4;886) 692.91*** | (df=4;860) 3,434.59*** |

Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01.

Fonte: Resultados da pesquisa.

Os resultados estimados mostraram-se consistentes em todos os modelos estimados (colunas 1 a 3), não havendo mudanças em termos de significância dos coeficientes estimados e com variações marginais nos coeficientes estimados. Estatisticamente, considerando os testes de Chow, BP e Hausmann pode-se identificar que o modelo mais ajustado em relação aos dados é o modelo de Efeito Aleatório (Teste de Hausmann não significativo).

Pode-se verificar, que a hipótese do presente estudo é confirmada, sendo que para os períodos em que se passou a utilizar o biodiesel misturado ao diesel as emissões de CO₂ reduziram em comparação ao período anterior a implementação do biodiesel. Sendo que a redução variou de 8% a 9,1% para B3_B8 e de 14,4% a 15,5% para B10_B12, mostrando-se estatisticamente significativa. Cabe destacar, que o maior percentual de redução de emissões para o período de vigência de B10_B12 traz evidências de que um maior percentual de biodiesel pode impactar em maiores benefícios ao meio ambiente, visto a redução nas emissões proporcionalmente maiores.

Adicionalmente, a relação positiva entre o consumo de diesel e as emissões de CO₂, sendo que a relação é elástica, em que uma variação de 1% no nível de consumo per capita de diesel está associado a uma variação positiva entre 1,01% a 1,05% aproximadamente, ceteris paribus. A variável dummy CV19 não se mostrou significativa, indicando que não se pode afirmar que houve uma alteração significativa nos níveis per capita de emissão de CO₂ no período da pandemia de covid 19.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou analisar longitudinalmente as mudanças no padrão das leis de implementação do biodiesel e a sua relação com as emissões de CO₂ nos estados e DF do Brasil. Foi possível identificar o impacto significativo do uso de biodiesel misturado no diesel como uma medida eficaz de mitigação das emissões de CO₂ no setor de transportes.

Além disso, como evidenciado em outros estudos verificou-se uma relação positiva entre o consumo de diesel e emissões de CO₂ no setor de transportes. Porém com a implementação do biodiesel como mistura ao diesel convencional, observou-se um efeito negativo sobre as emissões comparado ao período anterior, sendo que a maior proporção da mistura contribui em maior magnitude na redução das emissões per captas no setor de transportes, sendo uma evidência ainda não explorada na literatura e a principal contribuição desse estudo.

Dessa forma, acredita-se que esta análise possa contribuir para a elaboração de políticas públicas e estratégias de negócios para atingir níveis de emissão mais baixos e uma economia mais equilibrada no Brasil. Por fim, cabe destacar a importância da redução de emissões de CO₂ para mitigar o impacto das mudanças climáticas, um problema que afeta diretamente a saúde e o bem-estar da população.

REFERÊNCIAS

- ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Biodiesel. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>. Acesso em 08 de junho de 2024.
- ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Especificação do biodiesel. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em 08 de junho de 2024.
- BÖRJESSON, P. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective - what determines this? *Applied Energy*, Londres, v. 86, n. 5, p. 589-594. Mar. 2009.
- ESTEVES, R. A.; PEREIRA, R. G. Análise sobre a Evolução do Biodiesel no Brasil. *Revista Espacios*, v. 37, n. 2, p. 5, 2016.
- FEARNSIDE, P.M. Global warming response options in Brazil's forest sector: comparison of project-level costs and benefits. *Biomass and Bioenergy*, Vancouver, v. 8, n. 5, p. 309-322, 1995.

GALDOS, M.; CAVALETT, O.; SEABRA, J.E.A.; NOGUEIRA, L.A.H.; BONOMI, A. Trends in global warming and human health impacts related to Brazilian sugarcane ethanol production considering black carbon emissions. *Applied Energy*, Londres, v. 104, n. 1, p. 576–582, 2013.

GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A.; VILLEGAS, J.; PANICHELLI, L. Life cycle assessment of biofuels: energy and greenhouse gas balances. *Bioresource Technology*, New York, v. 100, p. 4919–4930, 2009.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. *Science*, New York, v. 315, n. 5813. p. 808-810, fv. 2007.

KIM, H.; KIM, S.; DALE, B. E. Biofuels, land use change, and greenhouse gas emissions: some unexplored variables. *Environmental science & technology*, v. 43, n. 3, p. 961-967, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de População e Indicadores Sociais. Gerência de Estudos e Análises da Dinâmica Demográfica. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html>>.

LAPOLA, D.M.; SCHALDACH, R.; ALCAMO, J.; BONDEAU, A.; KOCH, J. KOELKING, C.; PRIESS, J.A. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Arizona, v. 107, n. 8, p. 3388-3393; Fev. 2010.

MACEDO, I.C., SEABRA, J.E.A.; SILVA, E.A.R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, Londres, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

OVERMARS, Koen P. et al. Indirect land use change emissions related to EU biofuel consumption: an analysis based on historical data. *Environmental Science & Policy*, v. 14, n. 3, p. 248-257, 2011.

PERIN, Gismael Francisco et al. Emissões de motor agrícola com o uso de diferentes tipos de diesel e concentrações de biodiesel na mistura combustível. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 50, p. 1168-1176, 2015.

REIJNDERS, L.; HUIJBREGTS, M.A.J. Palm oil and the emission of carbon-based greenhouse gases. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 16, n. 4, p. 477-482, 2008.

RESOLUÇÃO ANP Nº 968, DE 30 DE ABRIL DE 2024. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=458461> Acesso em: 21 de Agosto de 2024.

RESOLUÇÃO CNPE nº 16/2018; Resoluções CNPE nº 4 e 10/2021; Resolução CNPE nº 11/2021; Resolução CNPE nº 14 e 25/2021 e 12/2022; Resolução CNPE nº 3/2023; Resolução CNPE nº 8/2024. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao_ultimas/?data=6&abr=federal&acao=Filtrar#resultado. Acesso em: 21 de agosto de 2024.

ROCHA, B. S. O.; CARRILHO, D. L. Utilização do Biodiesel como Forma de Reduzir a Emissão de CO₂, e os Custos com Óleo Diesel. *Anais do XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural*, Rio Branco-AC, 2008.

SEARCHINGER, T.; HEIMLICH, R.; HOUGHTON, R.A.; DONG, F. ELOBEID, A.; FABIOSA, J.; TOKGOZ, S.; HAYES, D.; HSIANG YU, T. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, Washington, v. 319, n. 5867, p. 1238-1240, Fev. 2008.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa <https://seeg.eco.br/>. Acesso em 08 de junho de 2024.

SILVA, P. R. F., FREITAS, T. F. S. De. Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. *Ciência Rural*, Santa Maria. V. 38, n.3, p. 843-851, maio-jun. 2008.

TIMILSINA, G.R.; MEVEL, S. Biofuels and climate change mitigation A EGC Analysis Incorporating Land-Use Change. Washington: World Bank. 2011. 29 p.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. *Econometric analysis of cross section and panel data*. MIT press, 2010.

VIANA, M. M. Inventário do ciclo de vida do biodiesel do óleo de girassol. São Paulo, 2008. 230 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.