

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE
ESTIMAÇÃO DE EMISSÃO DE CO₂ PARA CAMINHÕES NO
TRANSPORTE DE GRÃOS**

RAFAEL SALLES PEREIRA

**ORIENTADOR: Augusto Cesar de Mendonça Brasil
COORIENTADORA: Tálita Floriano dos Santos**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES

**PUBLICAÇÃO: T.DM-002/2023
BRASÍLIA/DF: ABRIL/2023**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE
ESTIMAÇÃO DE EMISSÃO DE CO₂ POR CAMINHÕES NO
TRANSPORTE DE GRÃOS**

RAFAEL SALLES PEREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TRANSPORTES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TRANSPORTES.

APROVADA POR:

**Augusto Cesar de Mendonça Brasil, Dr., (UnB)
(ORIENTADOR)**

**Marcio de Almeida D'Agosto, Dr., (UFRJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**Patrícia Bittencourt Tavares das Neves, Dra., (UFPA)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

BRASÍLIA/DF, 20 de abril de 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

PEREIRA, RAFAEL SALLES

Análise Comparativa entre Métodos de Estimacão de Emissão de CO₂ por Caminhões no Transporte de Grãos. Brasília, 2023.

xiv, 72 p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2023).

Dissertao de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1 – Emissão de CO₂

3 – Transporte de soja e milho

I – ENC/FT/UnB

2 – Consumo de combustível

4 – Equações de consumo

II – Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, R. S. (2023). Análise Comparativa entre Métodos de Estimacão de Emissão de CO₂ por Caminhões no Transporte de Grãos. Publicao T.DM-002/2023. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 72 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rafael Salles Pereira

TÍTULO DA DISSERTAO: Análise Comparativa entre Métodos de Estimacão de Emissão de CO₂ por Caminhões no Transporte de Grãos.

GRAU: Mestre

ANO: 2023

 concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertao de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicao e nenhuma parte dessa dissertao de mestrado pode ser reproduzida sem autorizao por escrito do autor.

Rafael Salles Pereira

“O amor é generoso, faz com que grandes coisas se realizem, excita sempre o que há de mais perfeito; o amor aspira ao que é superior e não se deixa deter por nada do terreno”

Beato Antônio Frederico Ozanam

DEDICATÓRIA

A todos que assim como eu acreditam em um mundo melhor!

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus que constantemente me guarda e me dá forças para superar as dificuldades. Também tenho gratidão a Imaculada Virgem Maria que nunca me desamparou quando busquei por sua intercessão.

Agradeço a meus pais, Euler Junqueira Pereira e Patrícia Rezende Salles Pereira, que sempre me apoiaram, desde meus primeiros passos até onde tenho chegado. Também aos meus irmãos, Vitor Salles Pereira e Thais Salles Pereira, por sempre estarem ao meu lado e acreditarem em mim.

Não posso me esquecer de minha noiva, Thamires Coutinho Carvalho, que com doce apoio fez questão de estar presente durante todo o desenvolvimento deste trabalho e por permitir que em breve, com a graça de Deus, casemo-nos.

Agradeço ao meu orientador, Augusto Cesar de Mendonça Brasil, que aceitou me orientar e muito me auxiliou na realização deste estudo e à minha coorientadora, Tálita Floriano dos Santos, que imensamente me ajudou com o conteúdo e a escrita desta dissertação.

Aproveito para agradecer a todas as pessoas que estiveram presentes nestes anos e de alguma forma me auxiliaram, dentre elas, Margarete Coutinho Monte Carvalho, Nicolau Carvalho Ribeiro, Bruno Nunes Texeira Ferreira, Camila L. O. Lucena, Jefferson Hishiyama da Silva, Edwin Francisco Ferreira Silva e Ulisses Gomes.

Ainda, agradeço à empresa que disponibilizou os dados utilizados e à Universidade de Brasília que me ofereceu ensino de qualidade e me formou bacharel e mestre em engenharia. Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos recebida.

RESUMO

No Brasil, o transporte de cargas é predominantemente realizado por rodovias e o país é um dos maiores produtores de soja e milho do mundo, com a movimentação destes grãos possuindo grande importância na rede logística do país. O estado do Mato Grosso é o maior produtor destes produtos agrícolas e cerca de 63,85% de sua produção tem como destino a exportação, o que exige que eles sejam deslocados por distâncias médias superiores a 1.000 quilômetros. Dessa forma, surge a necessidade de se quantificar a quantidade de CO₂ emitido no transporte dessa carga do seu ponto de origem até o porto para ser exportada. Por isso, após definir o município de Sorriso-MT como sendo o maior produtor de milho e soja do país e o porto de Santos-SP o maior exportador destes grãos, traçou-se uma rota rodoviária e estimou-se a quantidade de grãos movimentado entre estes dois pontos. Caracterizou-se a frota de caminhões brasileira e, adotando o veículo do tipo bitrem, calculou-se a quantidade de viagens necessárias para transportar toda a carga estimada. Com isso, estimou-se o consumo de combustível e a emissão de CO₂ destes caminhões com base na metodologia *Bottom-up* do IPCC. Propôs-se então a construção de equações de consumo com base em dados de veículos pesados cedidos por uma empresa de monitoramento de frotas para que fosse possível calcular, em conjunto com ciclos de velocidades também obtidos destes dados, o consumo de combustível de veículos em operação na rota desejada. Os resultados obtidos a partir do procedimento proposto se mostraram com bom grau de concordância com o obtido pela metodologia *Bottom-up*. Também se utilizou a ferramenta VECTO para realizar simulações a partir dos dados obtidos com a finalidade de se encontrar uma terceira estimativa de emissão de gases. Por fim, concluiu-se que a cadeia logística estuda emite entre 63,52 e 104,89 mil toneladas de CO₂, o que corresponde a até 67,39 kg de CO₂ por tonelada transportada.

ABSTRACT

In Brazil, cargo transport is predominantly carried out by road and the country is one of the largest producers of soybeans and corn in the world, with the movement of these grains having great importance in the country's logistics network. The state of Mato Grosso is the largest producer of these agricultural products and about 63.85% of its production is destined for export, which requires a movement of average distances greater than 1,000 kilometers. Thus, there is a need to quantify the amount of CO₂ emitted in the transport of this cargo from its point of origin to the port to be exported. Therefore, after defining the municipality of Sorriso-MT as the largest producer of corn and soy in the country and the port of Santos-SP as the largest exporter of these grains, a road route was traced and the amount of grain moved was estimated, between these two points. The Brazilian truck fleet was characterized and, adopting the bit-train vehicle, the number of trips needed to transport the entire estimated load was calculated. With this, the fuel consumption and CO₂ emissions of these trucks were estimated based on the IPCC Bottom-up methodology. It is then proposed to build consumption equations based on data from heavy vehicles provided by a fleet monitoring company so that it would be possible to calculate, together with speed cycles also obtained from these data, the fuel consumption of vehicles in operation on the desired route. The results obtained from the proposed procedure showed a good degree of agreement with that obtained by the Bottom-up methodology. The VECTO tool was also used to carry out simulations from the data obtained to find a third estimate of gas emissions. Finally, it was concluded that the studied logistics chain emits between 63.52 and 104,89 thousand tons of CO₂, which corresponds to up to 67,39 kg of CO₂ per transported ton.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	JUSTIFICATIVA	4
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	5
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2	PRODUÇÃO E ESCOAMENTO DA SOJA E DO MILHO BRASILEIROS	6
2.1	PRODUÇÃO DE SOJA E MILHO NO BRASIL	6
2.2	ESCOAMENTO E ENTRAVES LOGÍSTICOS	7
2.3	CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE GASES POLUENTES NO BRASIL	14
2.4	CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO A SER ESTUDADO	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	METODOLOGIAS DE ESTIMATIVA DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS E EMISSÃO DE CO ₂	20
3.1.1	Metodologia <i>Bottom-up</i>	20
3.1.2	Programa VECTO	22
3.2	PROCEDIMENTO PROPOSTO	23
3.2.1	Equações de consumo	23
3.2.2	Construção das curvas de consumo e obtenção das equações de consumo de caminhões graneleiros	24
4	RESULTADOS	28
4.1	TIPOLOGIA DOS CAMINHÕES BRASILEIROS	28
4.2	FATOR DE EMISSÃO DE CO ₂	36
4.3	QUANTIDADE DE SOJA E MILHO A SER TRANSPORTADA E NÚMERO DE VIAGENS NECESSÁRIAS	37
4.4	ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE CO ₂ POR TONELADA DE SOJA E MILHO CONFORME A METODOLOGIA <i>BOTTOM-UP</i>	39
4.5	SELEÇÃO DOS CICLOS DE VELOCIDADES DOS CAMINHÕES GRANELEIROS E CÁLCULO DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS EM CADA VELOCIDADE	40
4.6	ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE CO ₂ POR TONELADA DE SOJA E MILHO CONFORME A METODOLOGIA BASEADA NAS EQUAÇÕES DE CONSUMO DOS CAMINHÕES GRANELEIROS	42
4.7	INTERPOLAÇÃO DAS VELOCIDADES PRESENTES NOS CICLOS DE VELOCIDADES E OBTENÇÃO DO GREIDE E DAS INCLINAÇÕES DAS RODOVIAS ESTUDADAS	43

4.8	CONFIGURAÇÃO DA FERRAMENTA VECTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS PARA EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES	47
4.9	ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE CO ₂ POR TONELADA DE SOJA E MILHO: SIMULAÇÕES REALIZADAS NO VECTO	50
4.10	ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE CO ₂ POR TONELADA DE SOJA E MILHO CONFORME O MÉTODO <i>BOTTOM-UP</i> RECALCULADO	55
4.11	COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS	56
4.12	PRECIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO ₂	58
4.13	PROPOSIÇÃO DA CURVA DE CONSUMO UNIVERSAL.....	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5.1	CONCLUSÕES	61
5.2	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	62
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Produção de soja no Mundo, no Brasil e nos Estados Unidos na safra 2021/22 ...	6
Tabela 2.2 - Quantidade de grãos produzidos no estado do Mato Grosso e exportados por porto em 2014 (mil toneladas).....	13
Tabela 2.3 - Produção de soja e milho em toneladas do Brasil, do Mato Grosso e de Sorriso-MT em 2017 e em 2020	17
Tabela 2.4 - Exportação de soja e milho em toneladas em 2020	18
Tabela 3.1 - Fatores de emissão de CO ₂	21
Tabela 4.1 – Tipos de carga transportadas por caminhões.....	34
Tabela 4.2 - Tipos de caminhão	34
Tabela 4.3 - Tipos de carroceria de caminhões	34
Tabela 4.4 - Autonomia de caminhões pesados do ciclo Diesel por ano de fabricação.....	35
Tabela 4.5 - Massa molar dos elementos	36
Tabela 4.6 - Fatores de emissão para CO ₂	37
Tabela 4.7 - Produção e exportação de Sorriso conforme dados de 2020	38
Tabela 4.8 - Distribuição do número de viagens por caminhões da frota circulante e cálculo do consumo de combustível e da emissão de CO ₂	39
Tabela 4.9 - Consumo de combustível conforme estimativa usando equações de consumo e ciclos de velocidades	42
Tabela 4.10 - Resultados das simulações executadas no VECTO	51
Tabela 4.11 - Erros percentuais entre os ciclos de velocidades real e simulado.....	52
Tabela 4.12 - Consumo de combustível conforme estimativa usando equações de consumo geradas a partir de resultados das simulações do VECTO e ciclos de velocidades reais.....	55
Tabela 4.13 - Distribuição do número de viagens por caminhões da frota circulante e cálculos dos consumos de combustível e das emissões de CO ₂	56
Tabela 4.14 – Consumos médios de combustível em litros para cada 100 quilômetros percorridos.....	57
Tabela 4.15 - Emissão de CO ₂	57
Tabela 4.16 - Comparação entre consumos encontrados a partir das curvas reais e universal	60
Tabela 5.1 - Principais resultados calculados no trabalho.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Densidade da infraestrutura rodoviária pavimentada dos principais exportadores mundiais de soja e milho (km de infraestrutura rodoviária por 1.000 km ²	8
Figura 2.2 - Evolução do preço do “frete longo” de três regiões sojicultoras do Mato Grosso até o porto de Santos	10
Figura 2.3 - Mapa de fluxo de exportação de soja e milho entre regiões produtoras e portos. 12	
Figura 2.4 - Mapa com rotas de escoamento da produção agrícola do estado do Mato Grosso até portos brasileiros.....	13
Figura 2.5 - Emissões de gases de efeito estufa do Brasil de 1990 a 2020 (GtCO ₂ e)	15
Figura 2.6 - Emissões de gases de efeito estufa nas atividades do setor de energia (1970 – 2020)	16
Figura 2.7 - Consumo de combustíveis nos transportes (1970 – 2020)	16
Figura 3.1 - Fluxograma com passos da metodologia <i>Bottom-up</i>	22
Figura 3.2 - Curva de consumo versus velocidade do veículo 817120 na BR-163	26
Figura 3.3 - Curva de consumo versus velocidade do veículo 818555 na BR-364	26
Figura 3.4 - Curva de consumo versus velocidade do veículo 356271 na BR-050	27
Figura 3.5 - Fluxograma com passos da metodologia baseada nas equações de consumo de caminhões graneleiros	27
Figura 4.1 - Frota circulante de caminhões nos anos de 2012 a 2021	28
Figura 4.2 - Licenciamento de caminhões nos anos de 2012 a 2021	29
Figura 4.3 - Frota circulante de caminhões por idade em 2022	31
Figura 4.4 - Composição percentual da frota da BR-163 no MT por classe de veículo	35
Figura 4.5 - Rota entre o município de Sorriso-MT e o porto de Santos-SP pelas BR-163, BR-364 e BR-050	38
Figura 4.6 - Histograma de velocidades do veículo 817120 na BR-163.....	41
Figura 4.7 - Histograma de velocidades do veículo 818555 na BR-364.....	41
Figura 4.8 - Histograma de velocidades do veículo 356271 na BR-050.....	42
Figura 4.9 - Ciclos de velocidades de trecho de 20 quilômetros da BR-163	43
Figura 4.10 - Gradiente de trecho de 20 quilômetros da BR-163 e aplicação da média móvel.....	45
Figura 4.11 - Histograma de inclinações da BR-163	45
Figura 4.12 - Histograma de inclinações da BR-364	46
Figura 4.13 - Histograma de inclinações da BR-050	46
Figura 4.14 - Configurações adotadas na ferramenta VECTO para simulação	47
Figura 4.15 - Características do motor de 325kW presente no VECTO	48
Figura 4.16 - Configuração do veículo adotado nas simulações realizadas no VECTO.....	49
Figura 4.17 - Tabela exemplo de disposição de dados para <i>input</i> no VECTO	50
Figura 4.18 - Início do ciclo de velocidades da BR-364 da forma como foi inserida no VECTO	50
Figura 4.19 - Ciclos de velocidades real e simulado de 40 quilômetros da BR-364.....	52
Figura 4.20 - Curva de consumo versus velocidade do VECTO na BR-163.....	53
Figura 4.21 - Curva de consumo versus velocidade do VECTO na BR-364.....	54
Figura 4.22 - Curva de consumo versus velocidade do VECTO na BR-050.....	54
Figura 4.23 - Curva universal de consumo versus velocidade proposta para caminhões pesados	59
Figura 4.24 - Comparação entre as curvas de consumo universal e reais	60

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABIPEÇAS	Associação Brasileira da Indústria de Autopeças
AET	Autorização Especial de Trânsito
ALLMN	Ferrovias América Latina Logística Malha Norte
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ -eq	CO ₂ equivalente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
COP	Conferência das Partes
cv	Cavalos
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPL	Empresa de Planejamento e Logística
EUA	Estados Unidos da América
FE	Fator de Emissão
FENABRAVE	Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GEE	Gases do Efeito Estufa
GNC	Gás Natural Comprimido
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBTS	Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável
ICCT	<i>The International Council on Clean Transportation</i>
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MTPA	Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
ONU	Organização das Nações Unidas
PAM	Produção Agrícola Municipal
PBTC	Peso Bruto Total Combinado
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PNCT	Plano Nacional de Contagem de Tráfego
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
R ²	Coefficiente de determinação
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SENATRAN	Secretaria Nacional de Trânsito
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SINDIPEÇAS	Sindicato Nacional da Indústria de Componentes Automotores
SRTM	Missão Topográfica de Radar Embarcado
TKU	Toneladas por Quilômetro Útil
VECTO	<i>Vehicle Energy Consumption Calculation Tool</i>

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Cabeçalho da tabela contendo os dados disponibilizados.....	24
Quadro 4.1 - Definição das categorias de veículo.....	33

1 INTRODUÇÃO

A emissão de gases do efeito estufa (GEE) está intimamente ligada ao aquecimento global e às consequentes mudanças climáticas. O principal gás de efeito estufa é o CO₂ devido a sua concentração na atmosfera, seu tempo de vida e o seu potencial de aquecimento do planeta, por isso, é importante o controle dessas emissões (RIBEIRO *et al.*, 2003).

Em 2015, na 21ª Conferência das Partes (COP 21), celebrou-se o Acordo de Paris que busca manter o aquecimento global em 1,5 °C, traçando, para isso, o objetivo de se reduzir a emissão de gases do efeito estufa por meio de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs). As NDCs são responsabilidades assumidas pelos países baseadas em metas de redução de emissões estabelecidas pelas próprias partes (SOUZA & CORAZZA, 2017). No entanto, existe uma lacuna entre os planos nacionais de redução de emissões e os esforços necessários para se atingir a meta do Acordo de Paris (ALAYZA *et al.*, 2022).

O Brasil anunciou em sua primeira versão da NDC, o compromisso de reduzir suas emissões em 37% até 2025 e em 43% até 2030, tendo como referência as emissões do ano de 2005 (BRASIL, 2016). Em 2020, o país apresentou a atualização de sua NDC que sob críticas manteve as metas anteriormente estabelecidas (ROMEIRO *et al.*, 2021; BRASIL, 2020). Porém, em 2022, uma nova versão da NDC brasileira manteve a meta de 37% até 2025, mas subiu para 50% o objetivo de redução para 2030 (BRASIL, 2022).

Concomitantemente, a Agenda 2030 acrescenta o esforço dos países no sentido de cumprirem seus compromissos de redução de emissões de gases do efeito estufa a fim de manter o aumento da temperatura média global abaixo de 1,5°C com relação ao valor pré-industrial. Também apresenta, dentro do Objetivo 8, o compromisso de se desassociar o crescimento econômico dos países da degradação ambiental (ONU, 2015).

Salienta-se que, a redução da emissão de gases poluentes produzidos por veículos tem diversas consequências positivas, como a diminuição de doenças e mortes atreladas à respiração destes gases e consequentemente ganhos em questão de qualidade de vida e econômicos. Nesse sentido, estima-se que os ganhos financeiros resultantes da redução de gastos com saúde e de perdas de vidas permitiriam ao Brasil construir cerca de 2.700 quilômetros de ferrovias por ano (DEBONE *et al.*, 2020).

Como apontado por Debone *et al.* (2020), é urgente a necessidade de se controlar as emissões de gases poluentes por veículos de carga. Dessa forma, torna-se importante a adoção de efetivas regulamentações de controle da poluição do ar e políticas que melhorem a eficiência energética e diminuam o passivo ambiental do setor de transportes, tais como o incentivo ao uso de combustíveis mais limpos e a eletrificação de caminhões.

Nesse sentido, o uso de biocombustíveis tende a crescer no Brasil durante a década de 2020, reduzindo por consequência as emissões de GEE provenientes do setor de transportes e permitindo inclusive que o país possa atingir sua NDC (CACHOLA *et al.*, 2022).

Quanto à eletrificação dos veículos, o Brasil, por possuir uma matriz energética predominantemente baseada em fontes de energia limpas, revela-se como um país em que a

substituição da frota circulante por veículos elétricos resultaria em uma medida altamente efetiva com relação à diminuição da poluição do ar, com um potencial de redução entre 50% e 75% das emissões veiculares (NIMESH *et al.*, 2021).

Machado *et al.* (2020) apontam que no cenário do setor de transportes do estado de São Paulo, a substituição de caminhões a diesel por elétricos poderia alcançar em 2050 uma redução de 46% das emissões de gases do efeito estufa caso houvesse uma interrupção na venda de veículos a diesel a partir de 2030. Isso porque o sistema de geração de energia do estado e do Brasil como um todo é predominantemente composto por fontes renováveis. Dessa forma, os autores concluem que veículos elétricos, tanto os puros quanto os híbridos, podem permitir que o Brasil reduza consideravelmente suas emissões de gases poluentes.

Porém, como apontado por Silva e Pizzolato (2022), o Brasil ainda está em um estágio inicial quando se trata do uso de veículos elétricos no transporte rodoviário de cargas. O estudo afirma que mesmo com os benefícios em relação a sustentabilidade, desafios como falta de infraestrutura, alto custos de aquisição, baixa autonomia, elevado tempo de recarga e incipiência no mercado de reaproveitamento de baterias, dificultam a implantação de caminhões elétricos no país. Há ainda o entendimento por parte dos autores de que o transporte de cargas de longa distância apresentar-se-ia como uma segunda etapa na implantação de caminhões elétricos no mercado brasileiro, após, portanto, do seu uso em serviços de entregas urbanas.

Além disso, Sims *et al.* (2014) ressaltam a falta de avaliações abrangentes e consistentes do potencial mundial de redução de emissões de GEE e dos custos de mitigação no setor de transportes, sendo essa redução potencial menos certa no transporte de cargas que no de passageiros.

Em concordância, Machado *et al.* (2020) identificam a ausência de estudos que busquem compreender a emissão de gases do efeito estufa por parte de veículos de carga em rodovias em nível subnacional de países em desenvolvimento. Por isso, estimar a emissão de CO₂ resultante do deslocamento de carga em uma rota de um dos mais importantes fluxos de transporte do país é essencial para ajudar no preenchimento deste vazio na literatura e na elaboração de políticas eficazes voltadas para a redução de emissões do setor.

Com esse cenário, torna-se importante o desenvolvimento e a adoção de meios confiáveis de se estimar as emissões de CO₂ por parte do setor de transporte de carga rodoviário de longa distância no Brasil, ao mesmo tempo que se exige simplicidade dessas metodologias devido à baixa disponibilidade de dados.

1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

O Brasil é, junto dos Estados Unidos e da Argentina, um dos maiores exportadores de soja e milho do mundo, tendo atingido em 2020 uma exportação total de 116.471.264 toneladas destes grãos (COMEX STAT, 2020) e atendendo destinos longínquos como China e Europa. Para chegar a estes destinos, é preciso transportar os grãos de seu local de produção até os portos, de onde partem por via marítima. O deslocamento até os portos pode ser feito por rota rodoviária, ferroviária, hidroviária ou combinações entre elas, entretanto, a mais utilizada no transporte destes produtos agrícolas no Brasil é a rodoviária (CNT, 2015).

Dentre os estados brasileiros produtores de soja e milho, o Mato Grosso é o que possui maior produção e boa parte dela se destina a exportação (CNT, 2015). Porém, este estado da região centro-oeste do Brasil se encontra a distâncias médias superiores a 1.000 quilômetros do litoral. Dessa maneira, transportar de forma eficiente o grande volume de grãos produzidos neste estado até portos de exportação é um desafio.

O cálculo do consumo de combustível de caminhões pesados não é uma tarefa fácil, porém é essencial para se estimar a emissão de CO₂ de veículos de carga em corredores logísticos. Por outro lado, quantificar a emissão de CO₂ permite a realização de estudos e a implementação de políticas que visem a redução dessas emissões a níveis aceitáveis. Por isso, é importante determinar formas de se computar essas emissões que sejam aplicáveis à realidade brasileira.

Além disso, o não computo dessas emissões impede o conhecimento do impacto financeiro da adoção de medidas que diminuam o consumo de combustível de veículos. Muito além do puro preço do petróleo, o mercado de créditos de carbono é hoje uma fonte de recursos da qual o Brasil pode se beneficiar caso consiga diminuir suas emissões em setores como o transporte de cargas.

Por isso, uma das formas de auxiliar o país para o avanço de uma agenda sustentável, é por meio do estudo do transporte de soja e milho do interior do país até os portos, para que se possa estimar a emissão de poluentes frutos dessa importante cadeia logística. Diante disso, tem-se o seguinte problema de pesquisa: *Como calcular a taxa de emissão de CO₂ por tonelada de grãos do Brasil ao transportar soja e milho por caminhões em rotas inteiramente rodoviárias?*

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Mensurar o consumo de combustível e a emissão de CO₂ de veículos de transporte de grãos utilizados em rotas rodoviárias.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Caracterizar a dinâmica de produção e escoamento de soja e milho no Brasil e as rotas existentes entre esses pontos;
- II. Avaliar a frota de escoamento de grãos e definir um veículo típico de acordo com o padrão de carga transportada, autonomia e fator de emissão;
- III. Simular em uma ferramenta computacional a operação de um veículo realizando o escoamento de soja e milho pelo modo rodoviário a partir de dados reais de ciclos de velocidades de veículos de carga;
- IV. Comparar as estimativas resultantes da simulação computacional, da metodologia consolidada de inventário *Bottom-up* e da metodologia baseada em equações de

consumo, em relação ao consumo de combustível e a emissão de CO₂ durante o escoamento de soja e milho;

- V. Avaliar monetariamente os gastos resultantes da cadeia de escoamento estudada, tanto com relação ao consumo de combustível quanto com relação à emissão de CO₂.

1.3 JUSTIFICATIVA

O agronegócio brasileiro é um dos principais pilares da economia do país. Conforme publicação do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), o setor representou 27,4% do PIB brasileiro em 2021 (CEPEA, 2022).

Soja e milho são dois dos três produtos agrícolas brasileiros com maiores valores brutos de produção e somaram 440,7 bilhões de reais em 2020. Nesse mesmo ano foram produzidos no Brasil 226 milhões de toneladas de soja e milho, representando as duas culturas agrícolas com maior produção no Brasil (CNA, 2021; CAMPOS, 2021).

Devido às poucas opções de ferrovias e hidrovias para escoamento da produção, as rotas rodoviárias são intensamente usadas para o escoamento da produção de soja e milho no Brasil. Isso aumenta os custos e as perdas ao longo das rotas de transporte, diminui a eficiência de escoamento, e resulta em maiores consumos de combustível e emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do setor.

Branco *et al.* (2022) estimaram que são emitidos 21,9 kg de CO₂ por tonelada de soja e milho transportadas, podendo alcançar uma razão de 17,6 kg de CO₂ por tonelada caso houvesse a implantação dos principais projetos de ferrovias planejados no Brasil.

Segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), entre os anos de 2011 e 2020, o setor de Energia, no qual se inclui a atividade de transportes, foi responsável por 22% das emissões de CO₂ no Brasil. Além disso, ao se analisar as emissões do setor no mesmo período, nota-se que a atividade de transportes lidera, sendo responsável por 47% das emissões do setor de Energia, o que corresponde a 10% das emissões totais do país (SEEG, 2022).

Dentre as subcategorias que compõem o setor de Energia (que ao todo são 22), 43% das emissões na última década foram provenientes do rodoviarismo. Quanto à queima de combustíveis, 33% das emissões neste período dessa categoria foram provenientes da queima de Diesel de petróleo. Já com relação às emissões por tipo de veículo, caminhões foram responsáveis por 19% das emissões do setor de energia, contra 15% dos automóveis e 5% dos ônibus (SEEG, 2022).

Dessa forma, nota-se o impacto do transporte de carga realizado por caminhões na emissão de poluentes no Brasil. Por isso, torna-se importante estudar as dinâmicas de deslocamento de veículos de carga para compreender de forma mais detalhada como são feitas estas emissões e propor melhorias que ao serem implementadas permitam uma redução no consumo total de combustíveis fósseis e uma maior eficiência energética do setor.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Diante do exposto, definiu-se como objeto de estudo deste trabalho o transporte de soja e milho produzido no município de Sorriso-MT até o porto de Santos-SP com destino à exportação destes produtos. O percurso a ser adotado é o composto pelas BR-163, BR-364 e BR-050 e os dados utilizados são os referentes a produção e exportação de 2020.

Portanto, será realizada a estimativa do consumo de combustível e das emissões de CO₂ resultantes deste processo de escoamento por meio de três formas de cálculo de modo a comparar seus resultados.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo deste trabalho apresenta o problema a ser estudado, bem como os objetivos e a justificativa. No segundo capítulo, o referencial teórico corrobora com a realidade de produção e escoamento de soja e milho no Brasil. Os dados e os métodos de estimativa de emissões a serem utilizados neste estudo são descritos no terceiro capítulo. No quarto capítulo são apresentados os resultados e no quinto, as conclusões e recomendações do trabalho. Por fim, são indicadas as referências utilizadas.

2 PRODUÇÃO E ESCOAMENTO DA SOJA E DO MILHO BRASILEIROS

2.1 PRODUÇÃO DE SOJA E MILHO NO BRASIL

O Brasil é um dos maiores produtores de soja e milho do mundo. Segundo o relatório de entraves logísticos ao escoamento de soja e milho da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2015), o país produziu, aproximadamente 100 milhões de toneladas de grãos em 2000, tendo esta produção sido superada em 101,6% em 2014. Soja e milho representaram 85,8% da produção de grãos brasileira no mesmo ano, demonstrando a importância dessas culturas. O relatório acrescenta ainda que existem expectativas de crescimento da produtividade brasileira com a expansão da fronteira agrícola para a região nordeste.

Conforme Péra *et al.* (2021), a produção agrícola do Brasil, em especial a de soja e de milho, cresceu mais de 70% entre os anos de 2010 e 2019 e esta rápida expansão estaria ligada a adoção de novas tecnologias, produção de milho na entressafra e expansão de novas áreas para produção agrícola, principalmente no norte e nordeste do país. Esse aumento, segundo os autores, tem exercido pressão sobre a demanda de infraestrutura logística.

Segundo Hirakuri e Lazzarotto (2014), a soja representa 52,9% da área total de grãos do Brasil. Dessa forma, os autores enfatizam que o complexo agroindustrial da soja brasileira possui uma grande importância para o desenvolvimento regional do País, já que este gera riquezas, empregos e divisas ao movimentar diversos setores socioeconômicos como empresas de pesquisa e desenvolvimento, fornecedores de insumos, indústrias de máquinas e equipamento, produtores rurais, cooperativas agropecuárias, cooperativas agroindustriais, processadoras, produtores de óleo, fabricantes de ração e usinas de biodiesel, dentre outros.

A Tabela 2.1 apresenta a produção de soja na safra 2021/22 em âmbito mundial, no Brasil, nos Estados Unidos e em alguns estados brasileiros.

Tabela 2.1 - Produção de soja no Mundo, no Brasil e nos Estados Unidos na safra 2021/22

	Produção (mil toneladas)	Área plantada (mil hectares)	Produtividade (kg/ha)
Mundo	362.947	127.842	2.839
Brasil	123.830	40.922	3.026
Estados Unidos	112.549	33.313	3.379
Mato Grosso	39.961	10.909	3.663
Paraná	12.104	5.680	2.131
Rio Grande do Sul	9.728	6.358	1.530
Goiás	13.720	3.694	3.714

Fonte: Embrapa (2022).

Conclui-se da Tabela 2.1 que o Brasil produziu cerca de um terço de toda a soja mundial na safra de 2021/22, com uma produção maior que a dos Estados Unidos, embora com menor produtividade. Já com relação à produção por estado, tem-se que a produção do Mato Grosso correspondeu a aproximadamente um terço da brasileira e a mais de 10% da mundial, apresentando, inclusive, uma produtividade superior à dos EUA.

O relatório da CNT (2015) realizou uma consolidação de dados por estado, revelando ter sido,

na safra 2014/2015, o estado do Mato Grosso o maior produtor de soja e milho, com um total de 45.370 mil toneladas, seguido pelo Paraná com 31.854 mil toneladas e pelo Rio Grande do Sul com 19.432 mil toneladas. O relatório identifica ainda que em 2014, os estados de Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás e Mato Grosso do Sul foram responsáveis por 80,4% da produção nacional de soja e 69,5% da de milho. Entretanto, a fronteira agrícola continua a se expandir, e a região conhecida como Matopiba, localizada entre os estados de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, tem apresentado um crescimento na produção de grãos devido à disponibilidade de terras com baixos preços, quando comparados aos de áreas tradicionais de plantio, e ao alto potencial produtivo da região.

Telles *et al.* (2009) apresentaram a evolução do número de municípios produtores de soja e área total de plantação em um período de 30 anos (1975-2005) segregado por unidade da federação. Nesta análise fica evidente o salto na produção alcançado pelo estado do Mato Grosso, que em 1975 possuía apenas 3 hectares de área cultivada e em 2005 alcançou 6.106.654 hectares tendo uma produção de 15 milhões de toneladas e tornando-se o maior produtor do Brasil (29,7% do total produzido).

Hirakuri e Lazzarotto (2014), com dados do Balanço do comércio exterior do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, demonstraram que os quatro principais produtores de soja no Brasil, são também os maiores exportadores de produtos do complexo. Os estados de Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás apresentaram respectivamente, em 2014, 9,3 bilhões de dólares, 6,2 bilhões de dólares, 5,7 bilhões de dólares e 2,4 bilhões de dólares em valores de exportações do complexo agroindustrial da soja.

2.2 ESCOAMENTO E ENTRAVES LOGÍSTICOS

Quanto à exportação dos grãos brasileiros, tendo como referência dados da safra de 2013/2014 consolidados pelo relatório da CNT (2015), 23,5% da produção de milho e 52,1% da produção de soja tiveram como destino outros países. Desta forma, o Brasil está entre os três maiores exportadores de soja e de milho do mundo, sendo os Estados Unidos e a Argentina seus maiores concorrentes.

Os modos de transporte destes grãos, segundo o relatório da CNT (2015), são o rodoviário, o ferroviário e o hidroviário, sendo estes dois últimos os mais recomendados para o transporte de mercadorias em grande volume e com baixo valor agregado, como é o caso de grãos, em especial em grandes distâncias. O Brasil, entretanto, tem o modo rodoviário como principal meio de escoamento da produção agrícola devido a sua baixa densidade da malha ferroviária e subutilização de suas hidrovias. Ao comparar com os Estados Unidos, que possui uma distância média entre as zonas de produção e portos semelhantes, o Brasil apresenta o pior cenário. Em 2013, a distribuição modal brasileira contava com 65% de participação do modo rodoviário, 26% do ferroviário e 9% do hidroviário, enquanto na estadunidense era de 20%, 31% e 49%, respectivamente.

Conforme relatório do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (MTPA), o desbalanceamento da matriz de transporte de cargas, associado às deficiências da infraestrutura de transportes brasileira impactam diretamente no aumento dos custos de transporte e da ineficiência logística, diminuindo, portanto, a competitividade dos produtos brasileiros (MTPA, 2017).

Como demonstrado pelo relatório da CNT (2015), o modo rodoviário é recomendado para o transporte de cargas de volume pequeno ou médio e por distâncias curtas ou médias. A exportação de soja e milho brasileira é considerada de grande volume e grande parte da produção é feita no interior e precisa percorrer longas distâncias até um porto para ser exportada. Por isso, o transporte por caminhões deveria estar concentrado nos deslocamentos de pequena distância, como entre as unidades produtoras e terminais ferroviários ou portos interiores.

A este cenário acrescenta-se a situação do modo rodoviário brasileiro que possui extensão relativa pavimentada menor que a dos principais concorrentes conforme pode ser visto na Figura 2.1. O relatório mostra também que 63,4% das vias pavimentadas que escoam soja e milho encontram-se em situação regular, ruim ou péssima, tendo 77,6% delas recebido esta avaliação no quesito geometria, 66,2% no quesito sinalização e 41,3% em pavimento. Dentre estas rotas as de pior qualidade são as direcionadas para os portos das regiões norte e nordeste, tornando os fretes para estes portos maiores que os para os portos do sul e sudeste. Além disso, essa má qualidade das vias de escoamento acarreta prejuízos tais como maior consumo de combustível, desgaste acelerado da frota e um maior número de acidentes (CNT, 2015).

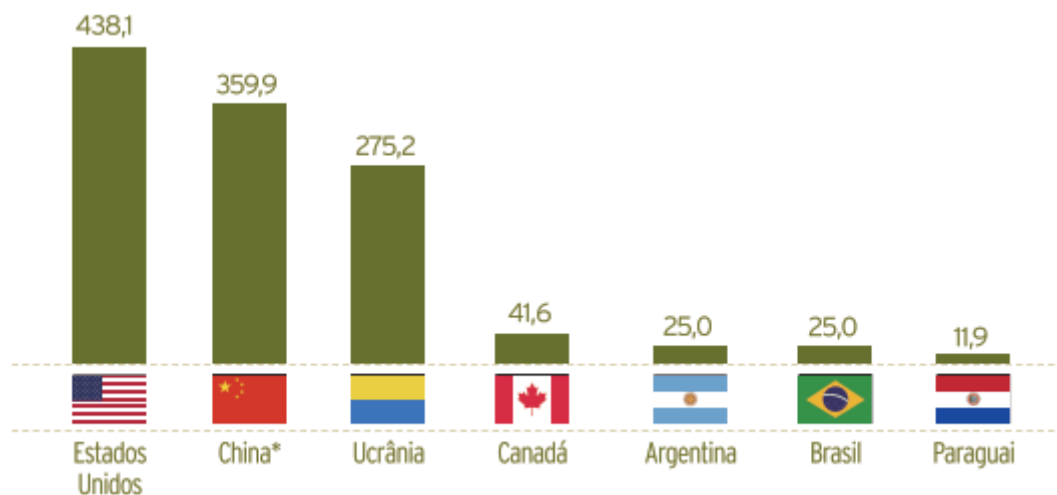


Figura 2.1 - Densidade da infraestrutura rodoviária pavimentada dos principais exportadores mundiais de soja e milho (km de infraestrutura rodoviária por 1.000 km²)

Fonte: CNT, 2015, com dados da CIA, IBGE e DNIT.

Notas: * Embora não seja um dos principais exportadores mundiais de soja e milho, a China foi considerada por representar o principal comprador da soja brasileira. A Índia não foi incluída nesse ranking.

A Figura 2.1 revela um grande contraste da logística de transporte de cargas brasileira que apesar de ser fortemente dependente do modo rodoviário, possui uma baixa densidade de malha pavimentada.

Ademais, devido ao alto volume a ser escoado e à baixa capacidade dos caminhões, a CNT (2015) revelou que muitos embarcadores de grãos relatam a insuficiência de oferta dos veículos. Isso faz com que as empresas busquem por veículos de maior capacidade que necessitam de Autorização Especial de Trânsito (AET), o que acelera o desgaste do pavimento.

Telles *et al.* (2009) afirmam que a produção de soja no Brasil é moderna e eficiente, tendo vantagens comparativas relacionadas ao clima, à disponibilidade de água e terras agricultáveis e à tecnologia que permitiu a criação de cultivares adaptáveis a todo território nacional. Essa

alta produtividade, entretanto, possui a logística de escoamento como obstáculo, atrapalhando na sua competitividade.

O Relatório de Corredores Logísticos Estratégicos do MTPA aponta que a infraestrutura logística voltada para o escoamento de grãos carece de investimentos e coloca em risco os bons resultados esperados com o aumento da produção e com a expansão da fronteira agrícola rumo ao norte do país. Além disso, este relatório justificou o estudo do escoamento de milho em conjunto com o de soja com base na sobreposição das principais rotas de escoamento destes dois produtos, além de ambos serem graneis sólidos agrícolas (MTPA, 2017).

O relatório da CNT (2015) destaca a importância de se explorar novas rotas de escoamento destes produtos a fim de tornar seus preços mais competitivos no mercado internacional. Por outro lado, os gargalos existentes penalizam a produção brasileira, já que a exploração do potencial agrícola brasileiro está relacionada à infraestrutura logística disponível e seus custos. Os entraves logísticos existentes perpassam pela má qualidade e distribuição regional da infraestrutura, inadequada distribuição modal e falta de incentivo para a multimodalidade.

Ao analisar a evolução da produção de soja frente a da expansão dos modos de transporte no Brasil em um período de 30 anos (1975-2005), Telles *et al.* (2009) concluíram que neste espaço de tempo os avanços tecnológicos permitiram o aumento da área plantada em 305%, ao passo que a infraestrutura de transporte cresceu 25,3%, com o modo rodoviário crescendo 34,4%, o ferroviário diminuindo 4,4% e a quantidade de portos aumentando em 45,8%. Analisando um cenário mais atual, segundo a Empresa de Planejamento e Logística (EPL) (2020), houve um aumento de 166,4% no transporte de soja e milho com destino às instalações portuárias em 2020 quando comparado com o ano de 2010, entretanto o investimento público federal aplicado nos setores aeroviário, aquaviário, ferroviário e rodoviário caiu 39,3% em valores de 2020 comparados aos de 2010.

A ineficiência logística brasileira atinge principalmente os produtores brasileiros que acabam por receber um menor valor pela sua produção. Conforme dito pela CNT (2015), os valores de comércio internacional destes grãos são estabelecidos pela Bolsa de Chicago, impossibilitando, pois, o acréscimo dos maiores custos de transporte ao preço final do produto, restando ao produtor este prejuízo.

Conforme apresentado pelo relatório da CNT (2015), o custo de transporte corresponde em média a um terço do valor do produto em produtos agrícolas. No caso de produções mais interioranas essa razão pode ser ainda maior, já que um dos principais fatores de influência no preço do frete é a distância de escoamento. Outros fatores, entretanto, também influenciam este valor como a qualidade da infraestrutura disponível e a existência de fretes de retorno, ambos igualmente deficientes quando se trata desta produção.

Almeida *et al.* (2011), ao analisarem a logística de escoamento de soja da região Centro-Oeste, destacaram que apesar de haver uma evolução das condições das rodovias brasileiras, as utilizadas no transporte de soja ainda apresentam estados ruins. A esse fator se acrescenta a baixa oferta de veículos no período de safra, aumentando significativamente o frete de escoamento. Dessa forma, os autores mostram a importância da ampliação de opções de escoamento com o aumento da oferta de modos de transporte e consequente diminuição da oscilação do preço do frete nos períodos de safra.

Silva e Marujo (2012) apresentam que o modo rodoviário é o principal utilizado para o escoamento da soja produzida no estado do Mato Grosso, sendo responsável por em média 80% de todo o transporte. Porém, os autores afirmam que devido as características do produto (grande volume e baixo valor agregado) e do deslocamento (de longa distância), os modos mais utilizados para este transporte deveriam ser o ferroviário e o hidroviário. Por esta razão a margem de lucratividade da soja produzida neste estado é muito menor que a de outras regiões, como a do estado do Paraná por exemplo.

Dentre os municípios produtores de soja no Mato Grosso, um dos de maior destaque pela sua grande produção é o de Sorriso, o que motivou Dionisio *et al.* (2015) a estudarem o seu escoamento. Os autores identificaram alguns pontos de entrave da cadeia logística de escoamento, tais como: i) a baixa integração dos subsistemas e a baixa oferta dos modais ferroviário e hidroviário resultam em uma dependência do modo rodoviário; ii) o uso do modo rodoviário para escoamento de commodities resulta em altos fretes e danos à carga; iii) a baixa disponibilidade de silos para o armazenamento da soja produzida faz com que os caminhões se tornem “armazéns móveis”; iv) a grande distância entre os polos geradores e os portos, além da baixa disponibilidade de rotas, aumentam os custos relativos ao transporte.

Segundo Hirakuri e Lazzarotto (2014), o preço médio do “frete curto” praticado entre as regiões produtoras do Paraná e suas unidades de recebimento das cooperativas era de 21 reais por tonelada em fevereiro de 2014. Já o preço médio do “frete longo” existente entre três importantes regiões produtoras do Mato Grosso e o porto de Santos era de 300 reais por tonelada em fevereiro e março de 2014. A evolução do “frete longo” destas três importantes regiões, dentre as quais inclui o município de Sorriso, é apresentada na Figura 2.2.

Além disso, as longas distâncias entre os polos produtores de soja e os portos de escoamento, associado à baixa qualidade do pavimento das rodovias brasileiras, à condição de armazenamento dos grãos nos veículos e ao estado de conservação das carroceiras dos caminhões que realizam esse escoamento, gera uma grande perda de carga durante o percurso, o que pode representar uma perda de 0,3% a cada 1.000 quilômetros no caso da BR-163 (TORRES *et al.*, 2017; DEMETINO & MACENO, 2017; CANEPPELE *et al.*, 2021).

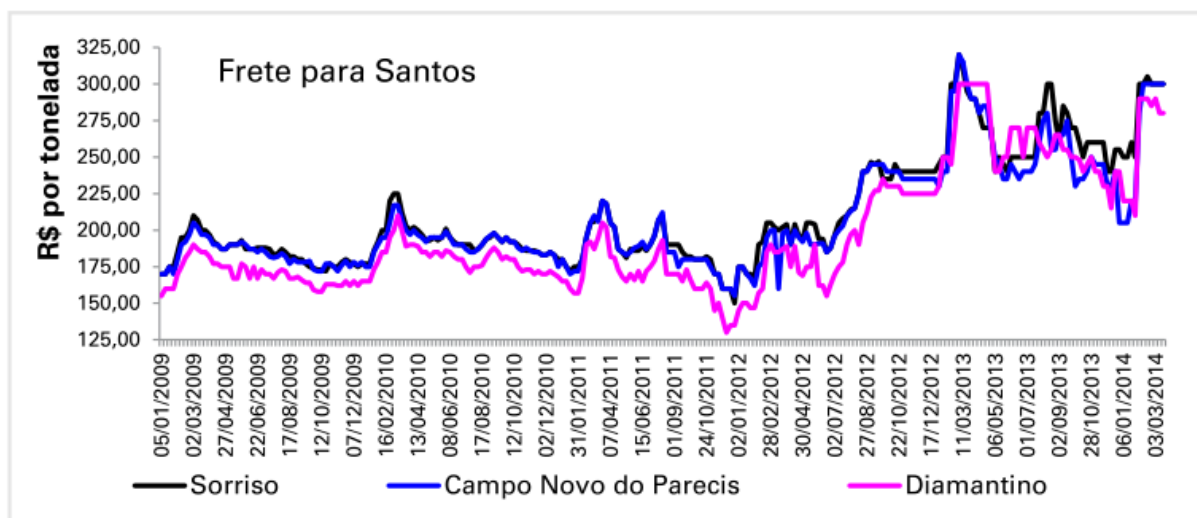


Figura 2.2 - Evolução do preço do “frete longo” de três regiões sojicultoras do Mato Grosso até o porto de Santos

Fonte: Hirakuri e Lazzarotto (2014).

Uma melhor distribuição no uso dos modos de transporte para escoamento da produção de soja brasileira poderia ajudar na estabilização e diminuição do custo do frete praticado entre o estado do Mato Grosso e os portos de escoamento. Nesse sentido, Lopes e Lima (2017) demonstraram que a implantação completa e operacional da hidrovia Tocantins-Araguaia é uma das alternativas mais viáveis para o transporte da soja produzida no Mato Grosso em relação às rotas existentes. Os autores encontraram uma economia de até 35,3% nos custos de transporte com o uso dessa alternativa e concluíram que o investimento necessário para sua implantação poderia ser pago em até 6 anos de operação.

Outra pesquisa, realizada por Vanzella *et al.* (2015), também demonstrou a importância de uma boa cadeia logística na composição dos custos de transporte. Os autores compararam três rotas existentes entre Sorriso-MT e portos de escoamento, uma rota apenas rodoviária, uma intermodal (rodoviária e ferroviária) e outra alternativa também intermodal (rodoviária e hidroviária). O estudo apontou que apesar da alternativa intermodal composta pelos modos rodoviário e hidroviário possuir a maior distância de viagem, até 17% maior que as outras, esta apresenta o menor custo de transporte, até 16% menor.

No estudo realizado pelo Relatório Corredores Logísticos Estratégicos do MTPA, 40% das 41 rotas de escoamento de soja e milho identificadas eram exclusivamente rodoviárias, ou seja, a logística de escoamento de soja e milho no Brasil não oferece muitas alternativas de transporte intermodal, impedindo o uso de modos mais eficientes e elevando os custos de transporte (MTPA, 2017).

Além do transporte, também é necessário um bom armazenamento para que se possa reduzir a variação dos preços das *commodities* e prolongar o seu período de comercialização. Ademais, o armazenamento da produção pode promover a venda dos produtos nas melhores épocas do ano, em que haja melhores preços e menores custos de transporte, evitando também os congestionamentos formados nos portos durante o escoamento em períodos de safra. Entretanto, a capacidade de armazenamento da produção agrícola brasileira não tem crescido na mesma proporção que esta produção, em especial na região Centro-Oeste, sendo o déficit de armazenamento de grãos do estado do Mato Grosso igual a cerca de 35,5% da safra estadual (MASCARENHAS *et al.*, 2014).

Também a capacidade dos portos de escoamento são pontos chave na cadeia logística de exportação da soja brasileira. Conforme Almeida *et al.* (2013), a conclusão da rodovia transoceânica, rodovia de ligação entre os litorais brasileiro e peruano, permitiu aos produtores de soja brasileiros a alternativa de exportação de sua produção à China por portos peruanos que são mais próximos da China que os brasileiros. Esta rodovia beneficia principalmente os produtores das regiões norte e centro-oeste, já que estes encontram-se mais distantes dos portos do Brasil. Como demonstrado pelo estudo, em um cenário de pleno funcionamento dos portos brasileiros, a alternativa do porto peruano de Ilo poderia ser utilizado por cidades produtoras de soja do estado de Rondônia, porém em um cenário de redução da capacidade dos principais portos de escoamento de soja brasileiros, esta alternativa passaria a ser viável também para cidades do Mato Grosso.

Em relação a preferência de uso de portos para exportação, o Relatório de Corredores Logísticos Estratégicos, com o uso de dados estatísticos do governo federal, demonstrou que 73,6%, 94,7% e 86,8% das exportações feitas pela região centro oeste de, respectivamente, soja, farelo de soja e milho, na safra de 2014/2015, foram feitas por meio de portos na região sudeste. O relatório

apontou, ainda, que 58% da soja, 84,7% do farelo de soja e 67,1% do milho exportados pelo porto de Santos em 2015 tiveram como origem os estados do Mato Grosso e do Mato Grosso do Sul (MTPA, 2017).

O mapa contido na Figura 2.3, desenvolvido por Péra *et al.* (2021), mostra os fluxos de exportação de soja e milho brasileiros dos polos produtores até os portos de exportação. Nele é possível observar o forte vínculo existente entre o estado do Mato Grosso e o porto de Santos.

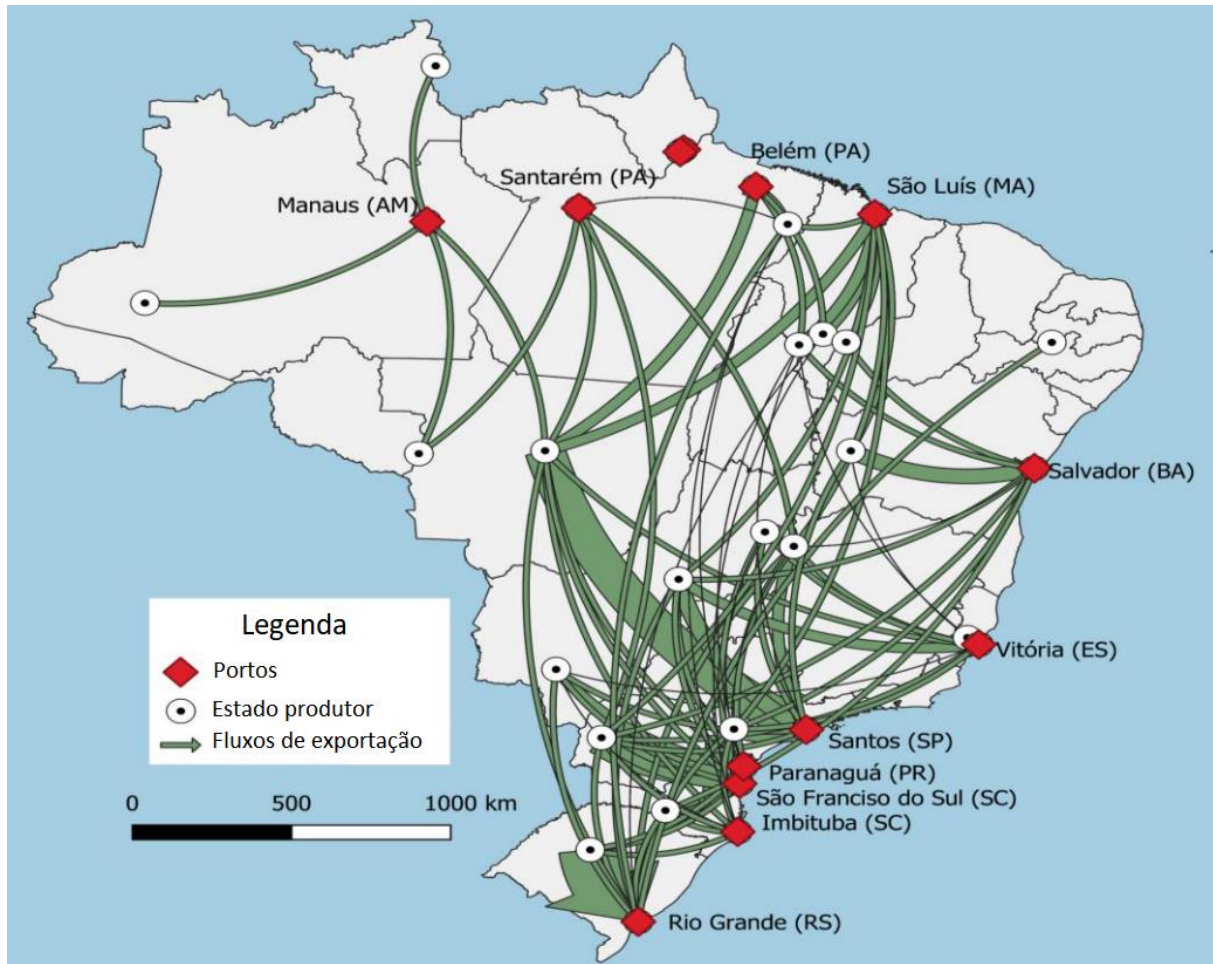


Figura 2.3 - Mapa de fluxo de exportação de soja e milho entre regiões produtoras e portos
Fonte: Péra *et al.* (2021).

Já o relatório da CNT (2015), baseado em dados de 2014, apresenta a quantidade de milho e soja da produção do estado do Mato Grosso escoado por alguns portos de exportação, como mostrado na Tabela 2.2, onde reafirma-se o grande vínculo entre o estado e o porto de Santos.

Tabela 2.2 - Quantidade de grãos produzidos no estado do Mato Grosso e exportados por porto em 2014 (mil toneladas)

Origem	Porto de destino	Milho	Soja	Farelo	Total	% em relação à origem
Centro-Oeste	Total	15.337,0	19.965,3	5.939,1	41.241,4	-
Mato Grosso	Total	10.970,0	14.211,0	4.293,2	29.474,2	100,0%
	Santos	6.021,6	7.199,6	3.152,8	16.374,0	55,5%
	Vitória	1.555,2	1.394,1	164,0	3.113,3	10,6%
	Paranaguá	765,7	1.494,2	584,9	2.844,8	9,6%
	Itacoatiara	746,5	912,6	391,5	2.050,6	7,0%
	Santarém	832,0	615,2	-	1.447,2	4,9%
	São Francisco do Sul	571,5	758,9	-	1.330,4	4,5%
	São Luís	370,0	505,8	-	875,8	3,0%
	Barcarena	74,0	624,8	-	698,8	2,4%
	Imbituba	-	377,2	-	377,2	1,3%
	Rio Grande	24,4	285,2	-	309,6	1,0%
Outros	9,1	43,4	-	52,2	0,2%	

Fonte: CNT, 2015.

Além disso, as rotas de escoamento da produção de soja e milho do Mato Grosso até os principais portos também foram apresentadas por este relatório, como reproduzido na Figura 2.4. Para chegar por rodovia até o porto de Santos, o principal exportador da produção deste estado, são utilizados principalmente, segundo o relatório, as rodovias que margeiam a Ferrovia América Latina Logística Malha Norte (ALLMN), como a BR-364. Entretanto, é possível fazer interligações com os modos ferroviário e hidroviário neste percurso (CNT, 2015).

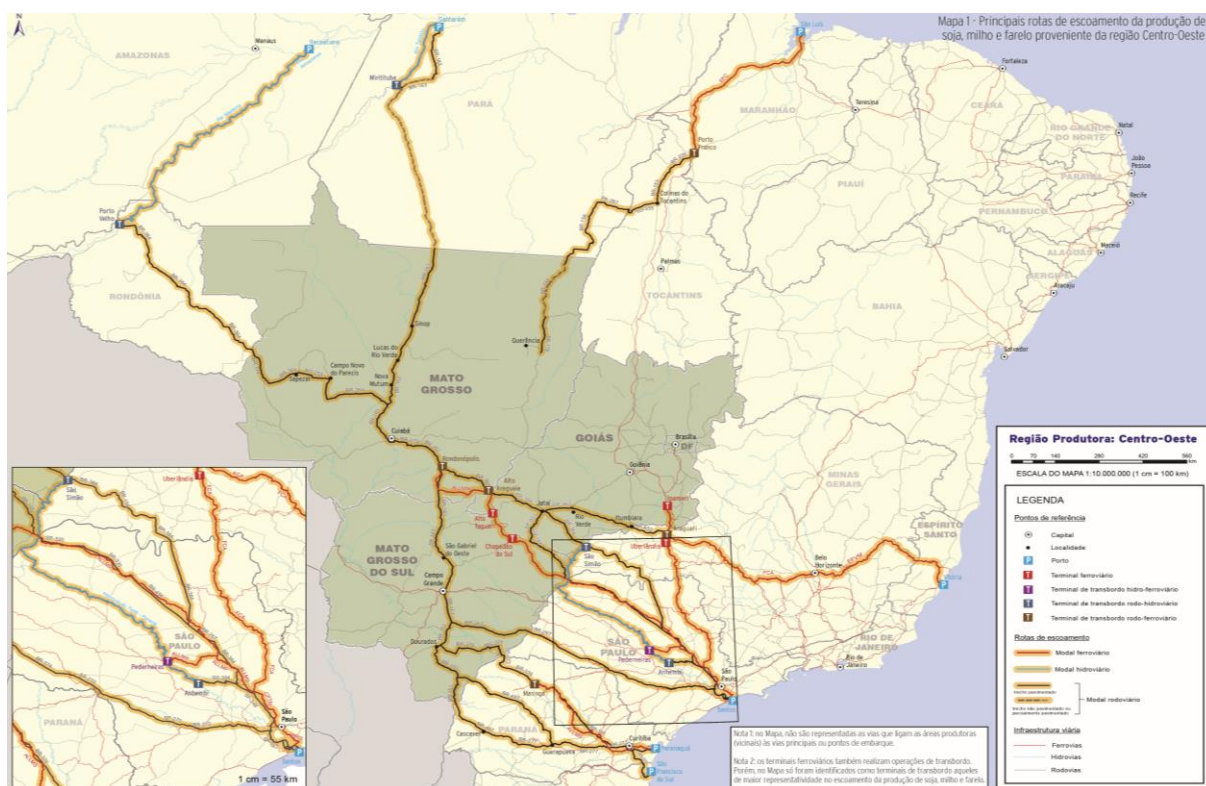


Figura 2.4 - Mapa com rotas de escoamento da produção agrícola do estado do Mato Grosso até portos brasileiros

Fonte: CNT, 2015.

Para melhorar a eficiência logística brasileira, o Brasil possui projetos de implantação de ferrovias. Conforme Branco *et al.* (2022), o governo brasileiro tem planos de aumentar os investimentos na construção de ferrovias, já que com a implantação destas espera-se aumentar a competitividade dos produtos agrícolas brasileiros ao melhorar a eficiência dos principais corredores de exportação, diminuir os preços de frete e a emissão de CO₂ e reduzir o número de caminhões pesados nas rodovias. Destaca-se ainda que os traçados planejados destas linhas férreas estão localizados próximas a regiões produtoras de soja e milho.

Péra *et al.* (2021) afirmam que com a expansão de ferrovias e hidrovias de navegação interna, a dependência do transporte rodoviário de longas distâncias irá diminuir ao passo que a demanda por este transporte para as curtas irá aumentar. Isso porque, segundo os autores, o Brasil enfrenta alguns desafios no escoamento de soja e milho, como a grande distância existente entre os polos produtores e os terminais ferroviários e hidroviários e a limitada infraestrutura destes dois modos de transporte. Dessa forma, o Brasil continua dependendo fortemente do transporte rodoviário.

A construção de novas ferrovias pode fazer com que o Brasil melhore a distribuição da utilização dos modos de transporte para a exportação de soja e milho. Branco *et al.* (2022) apresentam que, à época de seu estudo, 71% do transporte destas culturas era feita por rodovias, 25% por ferrovias e 4% por hidrovias, porém com a implantação de todas as ferrovias planejadas, esta divisão poderia ser de 40%, 48% e 12%, respectivamente. Além disso, quando comparado os cenários “atual” e “com todas as ferrovias construídas” observa-se que cerca de 20% das emissões de CO₂ são mitigadas e o preço do frete destes produtos reduz em 17%, isso porque os sistemas ferroviário e hidroviário são mais energeticamente eficientes que o rodoviário.

Ao analisarem a mudança na matriz de transportes referente ao transporte de soja e milho entre os anos de 2010 e 2019, Péra *et al.* (2021) concluíram que o transporte rodoviário de soja e milho diminuiu, indo de 75% para 67% e de 84% para 69%, respectivamente. Também observaram que a movimentação por trens e barcaças cresceu de 20% para 24% e de 5% para quase 9%, respectivamente, no caso da soja e de 15% para 21% e de 1% para quase 10%, respectivamente, no caso do milho.

2.3 CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE GASES POLUENTES NO BRASIL

Em 2020, ano em que se iniciou a Pandemia de Covid-19, enquanto muitos países apresentaram reduções em seus níveis de poluição atmosférica com relação ao ano anterior, o Brasil apresentou um aumento de 9,5% em suas emissões brutas de gases do efeito estufa, contra a redução mundial de 7%. A principal razão deste aumento foram as emissões provenientes do desmatamento, em especial na Amazônia e no Cerrado. Isso porque o aumento de 23,6% na emissão de gases provenientes de mudanças do uso da terra superou a queda das emissões do setor de energia que retornou aos níveis de 2011 (POTENZA *et al.*, 2021).

Entretanto, as emissões de CO₂ equivalente (CO₂-eq) associadas à matriz energética brasileira, ou seja, à produção e ao uso de energia no Brasil, experimentaram, conforme relatório da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) neste mesmo ano uma redução de 4,9% com relação ao ano de 2019, com o setor de transportes sendo responsável por 179,8 Mt CO₂-eq (45,1% do total de emissões associadas à matriz energética brasileira) (EPE, 2021).

A Figura 2.5 apresenta a evolução histórica de emissões de gases de efeito estufa do Brasil segmentados por setor. É possível notar que o principal fator responsável pelo aumento das emissões brasileiras em 2020 foi o desmatamento. O setor de agropecuária vem em segundo lugar com 27% das emissões, seguido pelo de energia (18%), pelo de processos industriais (5%) e por fim, pelo setor de resíduos (4%) (POTENZA *et al.*, 2021).

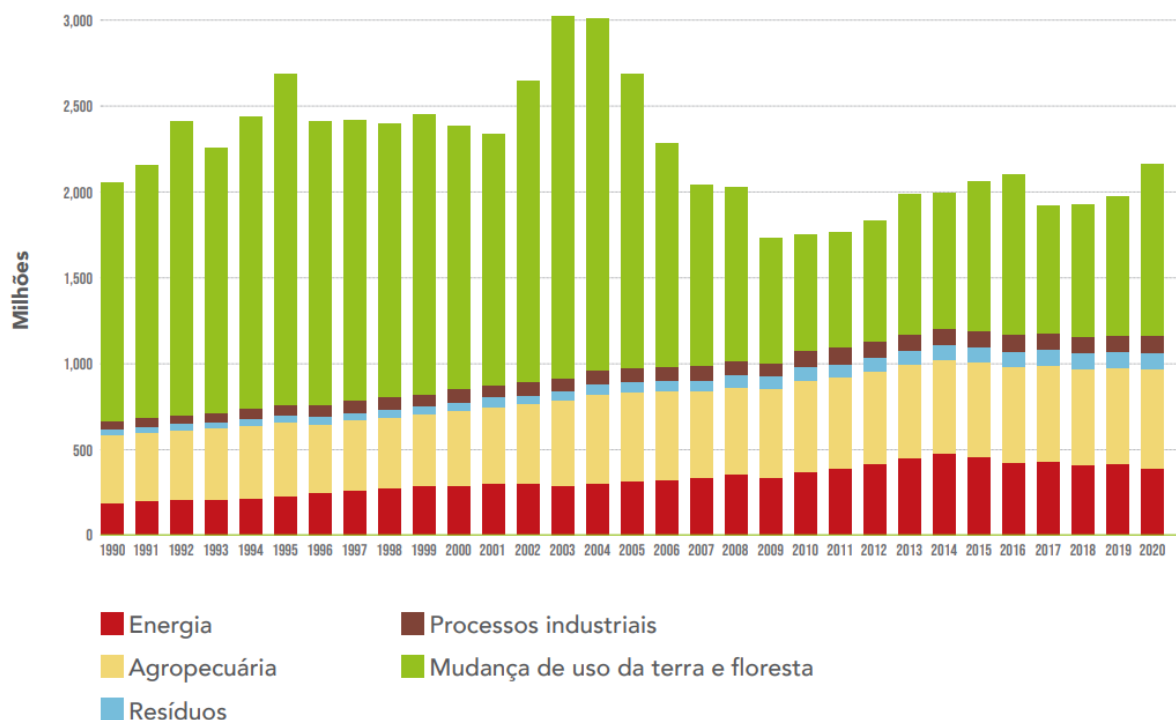


Figura 2.5 - Emissões de gases de efeito estufa do Brasil de 1990 a 2020 (MtCO₂e)

Fonte: Potenza *et al.*, 2021.

O Relatório do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) aponta que o Brasil é o quinto maior poluidor climático (atrás da China, Estados Unidos, Rússia e Índia) e é responsável por 3,2% das emissões mundiais. Quando analisada a emissão de CO₂ per capita em 2020, o país apresenta um valor de 10,2 toneladas, maior que o da média mundial que é de 6,7 toneladas. Cenário mais crítico se mostra ao analisar essa emissão per capita em estados amazônicos, como Mato Grosso e Rondônia, que em 2020 foi quatro vezes maior que a dos Estados Unidos, demonstrando novamente o peso do desmatamento nas emissões brasileiras (POTENZA *et al.*, 2021).

O setor de energia envolve as emissões provenientes de atividades como transporte, produção de combustíveis, consumo energético industrial, geração de eletricidade, consumo energético em edificações e agropecuária. A atividade de transporte é uma das mais significativas do setor de energia, porém, em 2020, ela apresentou uma queda nas emissões de 5,6% como pode ser observado na Figura 2.6 (POTENZA *et al.*, 2021).

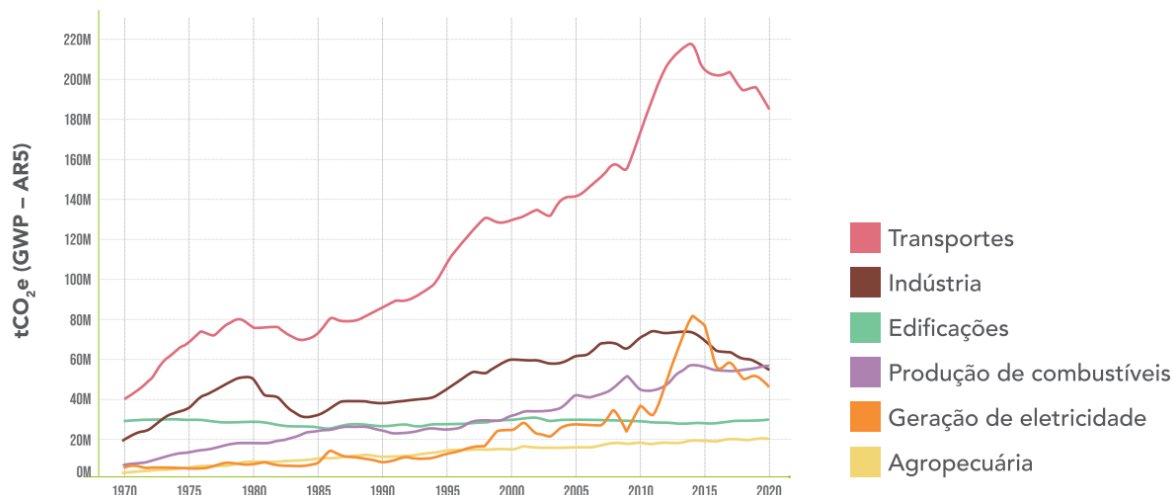


Figura 2.6 - Emissões de gases de efeito estufa nas atividades do setor de energia (1970 – 2020)

Fonte: Potenza *et al.*, 2021.

A queda nas emissões da atividade de transporte está relacionada com um menor consumo de combustíveis, como pode ser analisado na Figura 2.7. Em 2020, houve uma queda no consumo de querosene de aviação (42,8%), de gasolina (6,4%) e de etanol hidratado (14,7%), enquanto o consumo de diesel se manteve estável, porém com um aumento de participação do biodiesel, passando de 10% para 11% do total de diesel consumido. O aumento do consumo de biodiesel é interessante, pois a queima deste é considerada neutra com respeito a emissão de CO₂. Com isso, a redução de emissões do transporte de passageiros foi de 10% e do transporte de cargas de 1,6% (POTENZA *et al.*, 2021).

Em 2020, segundo relatório da EPE, houve uma queda de 6,4% do consumo de energia nos transportes em relação a 2019, entretanto o biodiesel experimentou um aumento de 8,4% em seu consumo devido a política de adição deste combustível no diesel fóssil que em 2019 atingiu uma taxa de 12% e perdurou com essa taxa por boa parte de 2020 (EPE, 2021).

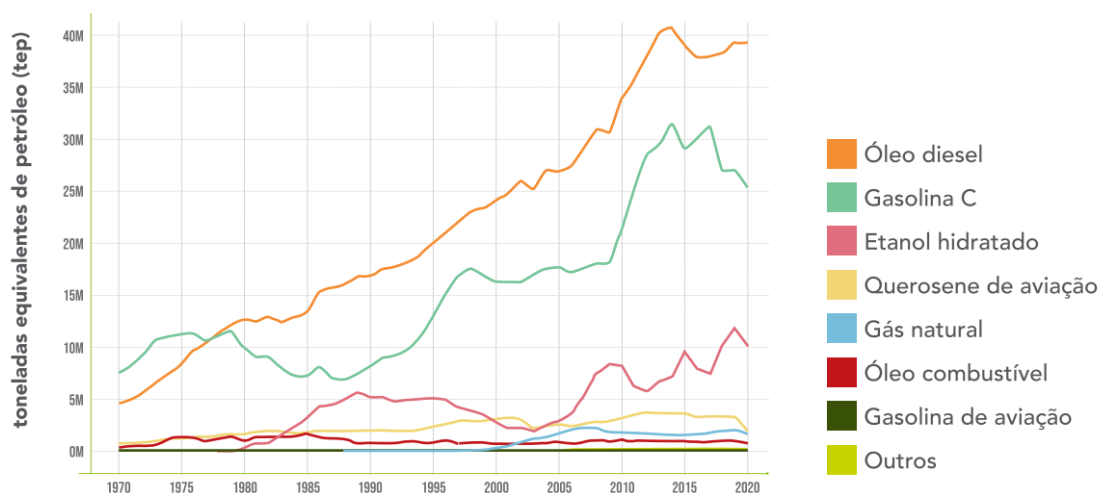


Figura 2.7 - Consumo de combustíveis nos transportes (1970 – 2020)

Fonte: Potenza *et al.*, 2021, com dados do Balanço Energético Nacional 2021 Ano-base 2020 (Ministério de Minas e Energia).

Como demonstrado por Branco *et al.* (2022), países com dimensões territoriais próximas a do

Brasil (como Estados Unidos, China, Canada, Índia e Rússia) e outros menores (como os europeus) estabeleceram políticas e objetivos para diminuir as emissões de gases poluentes no setor de transportes, em que o Brasil segue este esforço mundial e busca reduzir suas emissões. Para tal, planeja aumentar o uso de biocombustíveis, construir ferrovias e melhorar a eficiência energética dos caminhões produzidos no país com o programa “Rota 2030”, este programa também tem por objetivo incentivar o uso de combustíveis mais limpos neste segmento de veículos, como o álcool, biodiesel e gás natural comprimido (GNC).

Além disso, como afirmado por Silva e Marujo (2012), os modos ferroviário e hidroviário são mais econômicos financeiramente, apresentando um menor custo por quilômetro transportado que o modo rodoviário, e ambientalmente, já que emitem menores taxas de gases poluentes.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO A SER ESTUDADO

Segundo o Censo Agro 2017 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o estado do Mato Grosso foi o que mais produziu soja no Brasil durante o período da pesquisa (outubro de 2016 a setembro de 2017), com um total de 29.778.544 toneladas produzidas correspondendo a 28,87% da produção brasileira que foi igual a 103.156.255 toneladas. Dentro do estado o município com maior produção foi o de Sorriso com uma produção de 1.991.801 toneladas, correspondente a 6,72% da produção estadual e 1,93% da nacional (IBGE, 2017).

Quanto a produção de milho, o Censo Agro 2017 também apresenta o estado do Mato Grosso como o maior produtor do Brasil, tendo produzido no período censitário 28.555.889 toneladas de milho, ou seja, 32,41% da produção brasileira que foi de 88.099.622 toneladas. Dentro do estado, novamente Sorriso apresenta-se como o município de maior produção, com 2.845.919 toneladas colhidas, sendo responsável por 9,97% da produção do estado e 3,23% da do Brasil (IBGE, 2017).

A produção de soja e milho do estado do Mato Grosso em 2020 foi de respectivamente 35.070.044 toneladas (28,79% das 121.797.712 toneladas produzidas no Brasil neste ano) e 33.650.671 toneladas (32,37% das 103.963.620 toneladas produzidas no Brasil), segundo dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). Conforme essa mesma base de dados, apenas o município de Sorriso produziu 2.283.300 toneladas de soja (6,51% da produção do estado e 1,87% da brasileira) e 3.190.928 toneladas de milho (9,48% da produção estadual e 3,07 da nacional) (SIDRA, 2021).

A Tabela 2.3 apresenta as produções de soja e milho do Brasil, do Mato Grosso e de Sorriso em 2017 e em 2020 em toneladas.

Tabela 2.3 - Produção de soja e milho em toneladas do Brasil, do Mato Grosso e de Sorriso-MT em 2017 e em 2020

		Brasil	Mato Grosso		Sorriso-MT		
		Total brasileiro (t)	Total estadual (t)	% do total brasileiro	Total municipal (t)	% do total estadual	% do total brasileiro
2017	Soja	103.156.255	29.778.544	28,87%	1.991.801	6,69%	1,93%
	Milho	88.099.622	28.555.889	32,41%	2.845.919	9,97%	3,23%
2020	Soja	121.797.712	35.070.044	28,79%	2.283.300	6,51%	1,87%
	Milho	103.963.620	33.650.671	32,37%	3.190.928	9,48%	3,07%

Nota: Dados de 2017 provenientes do Censo Agro 2017 e dados de 2020 oriundos da Produção Agrícola Municipal (PAM), ambos sistemas do IBGE.

Conforme o Comex Stat, plataforma de acesso gratuito às estatísticas de comércio exterior do Brasil do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, foram exportadas por via marítima, em 2020, 82.290.456,958 toneladas de soja (67,56% do total produzido), deste montante 22.059.564,060 toneladas (26,81% do total exportado) eram oriundas do estado do Mato Grosso. Com relação à exportação de milho por via marítima, neste mesmo ano o Brasil exportou 34.180.807,412 toneladas de milho (32,88% do total produzido) com 21.820.723,782 toneladas tendo como origem o estado do Mato Grosso (63,84% das exportações totais brasileiras deste produto). Estes dados são melhor apresentados na Tabela 2.4 (COMEX STAT, 2020).

Os dados de exportação do Comex Stat são reafirmados pelos dados do AgroStat que apresenta uma exportação brasileira de soja em grãos produzidas no Mato Grosso, em 2020, igual a 22.326.237,397 toneladas, valor igual ao da soma dos quantitativos exportados de soja apresentados pelo Comex Stat pelas vias marítima e não declarada, 22.059.564,060 e 266.673,337 toneladas respectivamente. O mesmo ocorre com os dados e exportação de milho produzido no Mato Grosso em 2020, que segundo o AgroStat foram de 22.032.850,461 toneladas e conforme a Comex Stat a soma das exportações por via marítima (21.820.723,782 t), via não declarada (206.251,114 t), rodoviária (4.736,165 t) e fluvial (1.200 t), foi de 22.032.911,061 toneladas (AGROSTAT, 2020).

O Anuário estatístico da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) afirma que em 2020 foram exportados em Longo Curso 80.855.687 toneladas de soja pelos portos brasileiros. O porto de Santos foi o responsável pelo maior quantitativo de exportação de soja brasileira em Longo Curso com um total de 17.118.665 toneladas (21,17% do total). Com respeito à exportação em Longo Curso de milho em 2020, o Anuário indica que foram exportadas 32.414.703 toneladas e novamente o porto de Santos foi o maior exportador do Brasil com 13.069.263 toneladas (40,32% do total) (ANTAQ, 2020).

Tabela 2.4 - Exportação de soja e milho em toneladas em 2020

	Brasil		Mato Grosso		Porto de Santos	
	Total exportado (t)	% do total brasileiro produzido	Total exportado (t)	% do total brasileiro exportado	Total exportado pelo Porto de Santos (t)	% do total brasileiro exportado pelo Porto de Santos
Soja	82.290.457	67,56%	22.059.564	26,81%	17.118.665	21,17%*
Milho	34.180.807	32,88%	21.820.724	63,84%	13.069.263	40,32%*

*Valores percentuais calculados sobre os valores de exportação por portos brasileiros em 2020 apresentados pelo Anuário estatístico da ANTAQ, 80.855.687 toneladas para soja e 32.414.703 toneladas para milho.

Almeida *et al.* (2013), ao simularem o escoamento de soja das 20 cidades brasileiras que mais produzem este grão, dentre elas Sorriso-MT, por meio de 6 portos, dentre eles 4 brasileiros, demonstraram que o porto de Santos exportaria 100% da soja produzida por Sorriso destinada à exportação caso estivesse com sua capacidade total disponível. Isso demonstra a forte tendência de exportação dos produtos agrícolas deste município pelo porto de Santos.

Dionisio *et al.* (2015) apresentam as principais rotas de escoamento para a soja produzida em Sorriso. As alternativas para escoamento da produção até o porto de Santos foram: 1) inteiramente rodoviária, via BR-163 e BR-364, em um total de 1.935 km e 2) intermodal, com a carga sendo transportada por 835 km no modo rodoviário até Alto Araguaia-MT e daí

seguindo via ferrovia por 1.100 km.

Ao estudar rotas intermodais de escoamento da produção de soja de Sorriso até portos para exportação, Silva e Marujo (2012) descreveram uma das rotas possíveis entre o município e o porto de Santos. Primeiro segue-se no modo rodoviário por meio das rodovias MT-140 e BR-364 até a cidade de Alto Araguaia-MT onde ocorre o transbordo para o modo ferroviário por meio da ferrovia Rubinéia-Cuiabá e a partir de Rubinéia-SP pela EF-364 até o porto de Santos-SP.

Outro estudo que apresentou possíveis rotas de escoamento da produção de Sorriso para o porto de Santos foi o Relatório Corredores Logísticos Estratégicos do MTPA que analisou 4 rotas ligando estes dois pontos, três delas intermodais e uma inteiramente rodoviária. Das quatro rotas, a inteiramente rodoviária foi a que apresentou maior valor de movimentação (reais por tonelada), sendo 18,6% mais cara que a rota com menor valor de movimentação, uma rota intermodal rodoferroviária com transbordo na cidade de Rondonópolis-MT (MTPA, 2017). Esta comparação é condizente com a conclusão de Correa e Ramos (2010) de que o uso da intermodalidade no escoamento de soja do Centro Oeste proporcionaria custos entre 15% e 20% menores que o puramente rodoviário.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Dong *et al.* (2020) afirmam que modelos de quantificação de emissões são importantes para prover dados que permitam a elaboração de projetos de rodovias e a escolha de rotas com foco na baixa emissão de carbono.

Dessa maneira, são apresentadas as três formas de estimar consumo de combustível e emissão de CO₂ desenvolvidas neste trabalho. Inicialmente, o consumo de combustível e emissões de CO₂ foram avaliados com a metodologia do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2006), posteriormente, o presente trabalho propõe uma metodologia com base em curvas de correlação de consumos e emissões obtidas de dados reais de caminhões de transporte de grãos nas rotas definidas. Adicionalmente, foi realizada uma simulação, em ferramenta computacional, dos veículos de transporte de grãos.

3.1 METODOLOGIAS DE ESTIMATIVA DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS E EMISSÃO DE CO₂

3.1.1 Metodologia *Bottom-up*

As emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis por motores podem ser encontradas multiplicando-se o combustível consumido e o fator de emissão desse combustível conforme a Equação (3.1) (IPCC, 2006).

$$E = \sum_a (C_a * FE_a) \quad (3.1)$$

Onde:

- E = Emissões de CO₂ (kg);
- C_a = Combustível consumido (L);
- FE_a = Fator de Emissão do combustível (kg/L);
- a = Tipo de combustível (exemplo: gasolina, diesel, etanol etc.).

Para determinar o combustível consumido, pode-se fazer uso da Equação (3.2), na qual considera-se a frota de veículos em circulação, a distância percorrida por esses veículos e o consumo de combustível de cada veículo (IPCC, 2006).

$$C = \sum_{i,j,t} (V_{i,j,t} * D_{i,j,t} * CV_{i,j,t}) \quad (3.2)$$

Onde:

- C = Combustível consumido (L);
- V_{i,j,t} = Número de veículos;
- D_{i,j,t} = Distância percorrida (km);

- $CV_{i,j,t}$ = Consumo dos veículos (L/km);
- i = Tipo de veículo;
- j = Tipo de combustível;
- t = Tipo de rodovia (exemplo: urbana, rural etc.).

A forma de cálculo apresentada é chamada metodologia *Bottom-up* e é utilizada quando se tem disponível dados da frota de veículos, da intensidade de uso, do consumo dos veículos e dos fatores de emissões. Esta metodologia é a utilizada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) em seu relatório anual de emissões veiculares no estado de São Paulo (CETESB, 2022a).

Portanto, para o cálculo de emissões de CO₂, é necessário que se conheça o tamanho da frota em estudo, a distância percorrida por essa frota, a autonomia dos veículos que a compõe e o fator de emissão (FE) do combustível consumido por esses veículos.

O tamanho da frota será estimado pela quantidade de caminhões necessários para transportar a carga desejada e a distância percorrida será calculada com base na distância entre os pontos de origem e destino por meio da rota desejada. A autonomia dos veículos, por sua vez, pode variar, a depender do ano de fabricação do caminhão, por isso, é necessário caracterizar a composição da frota a fim de se conhecer a sua estratificação por idade. Já o FE a ser adotado, será o mais recente disposto pelo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2014) e pela CETESB em seu relatório de emissões veiculares de 2020 para o ano de 2018 e que se mantém praticamente inalterado desde 2001, como pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Fatores de emissão de CO₂

Ano	FE por combustível (kg/L)			
	Gasolina A	Etanol Anidro	Etanol Hidratado	Óleo Diesel
1980	2,209	1,526	1,457	2,631
1981	2,209			2,646
1982	2,212			2,656
1983	2,261			2,649
1984	2,258			2,674
1985	2,278			2,665
1986	2,275			2,686
1987	2,261			2,680
1988	2,281			2,671
1989	2,266			2,686
1990	2,261			2,686
1991 – 1997	2,261			2,674
1998	2,243			2,646
1999	2,232			2,631
2000	2,220			2,613
2001 – 2004	2,212			2,603
2005 – 2018	2,212			2,603

Fonte: CETESB (2022a).

O fluxograma contido na Figura 3.1 apresenta de forma resumida os passos empregados para o cálculo da emissão de CO₂ decorrente do transporte de soja e milho para exportação de Sorriso-MT até o porto de Santos-SP conforme a metodologia *Bottom-up*.

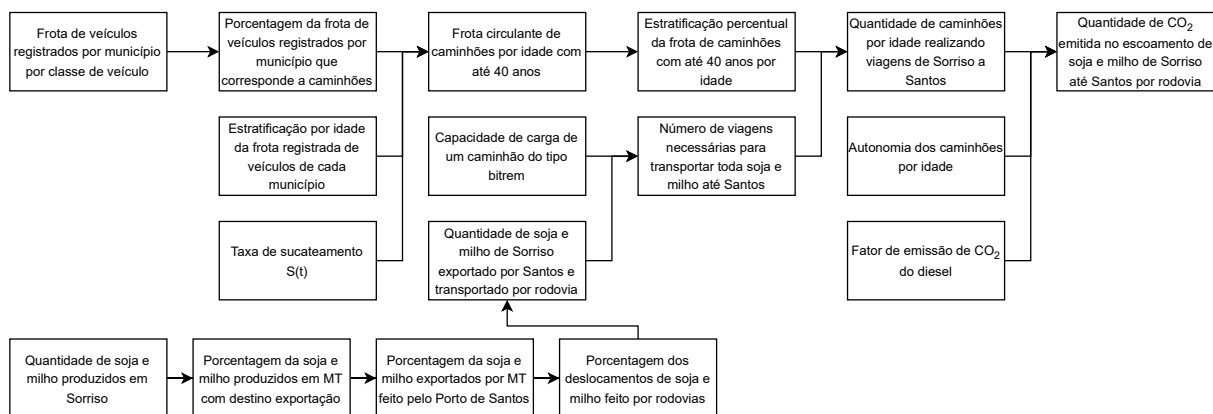


Figura 3.1 - Fluxograma com passos da metodologia *Bottom-up*

3.1.2 Programa VECTO

Conforme relatório do *The International Council on Clean Transportation (ICCT)* (2019), países e regiões como Japão, China, Estados Unidos, Canadá, Índia e União Europeia têm desenvolvido políticas para diminuir o impacto ambiental de veículos pesados os quais compõem um setor do transporte que tem crescido rapidamente. Porém, existem, segundo o relatório, dois grandes desafios que tornam difícil estimar a eficiência energética de um caminhão pesado: 1) estes veículos apresentam diversas possíveis configurações e padrões de operações; 2) um mesmo motor pode ser usado em vários tipos de chassis e transmissões tornando a medida do seu consumo de combustível uma tarefa complicada.

Zacharof *et al.* (2017) ratificam essa ideia ao afirmar que diferente de veículos leves, veículos pesados possuem uma variedade de possíveis configurações que se adaptam às suas necessidades de operação. Por isso, conforme os autores, é difícil avaliar as emissões de CO₂ por meio de dinamômetros de chassi para monitorar a conformidade desses veículos com a legislação.

Para contornar estes problemas, tem-se buscado alternativas de avaliação do desempenho de veículos pesados com base na combinação de testes de componentes e simulações veiculares. A partir da testagem de componentes tem-se dados necessários para rodar simulações que possam estimar o consumo de combustível e a emissão de CO₂ sob diversas condições. Com isso, pode-se simular várias configurações veiculares com diferentes cargas e ciclos de operação (ICCT, 2019).

Nesse sentido, a União Europeia adota desde 2017 a Ferramenta de Cálculo de Consumo de Energia Veicular (*Vehicle Energy Consumption Calculation Tool - VECTO*) para calcular as emissões de CO₂ de veículos pesados (ZACHAROF *et al.*, 2019a).

Assim como outros programas de simulação disponíveis, o VECTO é um modelo físico de emissão que permite modelar várias condições de operação. Tais modelos físicos são considerados eficazes e úteis para processos de tomada de decisão, entretanto, demanda um vasto conjunto de parâmetros de entrada (LAJEVARDI *et al.*, 2018).

Segundo Roso e Martins (2016), modelos computacionais possuem o potencial de gerar previsões mais precisas ao considerar um maior número de variáveis. Porém, os autores

advertem que os dados de entrada podem possuir índices de incerteza ou até mesmo não estarem disponíveis, resultando na necessidade da adoção de simplificações no modelo.

Dessa forma, o VECTO é uma ferramenta de simulação de veículos pesados, que incluiu caminhões e ônibus. Essa ferramenta possui dois modos de simulação, uma de declaração e outro de engenharia. No modo de declaração, uma configuração veicular e ciclos de condução são selecionados conforme a legislação europeia para fins de certificação, enquanto no modo de engenharia o usuário possui mais liberdade na escolha no tipo de veículo, sua configuração e parâmetros que o compõem (ZACHAROF *et al.*, 2019a; ZACHAROF *et al.*, 2019b; ZACHAROF *et al.*, 2017).

O VECTO possui três principais categorias de entrada de dados, aqueles que correspondem ao motor, os do veículo e os da caixa de velocidades. Além disso, o programa permite a inserção de outros dados colhidos em campo, como ciclo de velocidades e declividade do greide, desde que em conformidade com o formato de entrada da ferramenta (ZACHAROF *et al.*, 2019b).

Apesar de não ser um parâmetro de inserção obrigatória no VECTO, o perfil de elevação do percurso é uma informação de grande influência na realização de simulações de operação. Lajevardi *et al.* (2018) indicam que sua não inserção pode significar uma subestimação de emissões de CO₂ de até 24% em terrenos com muitos gradientes íngremes.

3.2 PROCEDIMENTO PROPOSTO

3.2.1 Equações de consumo

É possível estimar o consumo de combustível, e por consequência a emissão de CO₂, de um veículo ao percorrer um trajeto a partir do seu ciclo de velocidades, ou seja, o registro das velocidades desenvolvidas por ele ao longo de sua rota.

Para isso, é necessário que se conheça a curva de consumo deste veículo que é a relação entre cada velocidade possível e o consumo de combustível nessa velocidade. Essa relação pode ser representada por uma equação de potência como a apresentada na Equação (3.3).

$$C = a * v^b \quad (3.3)$$

Onde:

- C = Consumo de combustível (L/km);
- v = Velocidade (km/h).

Para a construção dessa curva, é preciso que se conheça registros de consumo para cada velocidade possível. A partir deles, calcula-se o consumo médio de cada velocidade e a junção desses consumos médios por velocidade em um gráfico possibilita o estabelecimento do ajuste do tipo potencial. A determinação de o quão correspondente aos pontos plotados este ajuste é pode ser feita por meio do coeficiente de determinação, também chamado de R². Isso quer dizer que quanto maior o R², que varia de 0 a 1, encontrado para a equação potencial de ajuste, melhor essa equação descreve os pontos que a construíram.

Sabendo o consumo de combustível característico de cada velocidade pode-se multiplicar este consumo pela distância percorrida pelo veículo ao longo do trecho nestas velocidades para se encontrar o total de combustível consumido conforme a Equação (3.4).

$$C_t = \sum_v C_v * d_v \quad (3.4)$$

Onde:

- C_t = Consumo total de combustível (L);
- C_v = Consumo de combustível característico da velocidade v (L/km);
- d_v = Distância percorrida na velocidade v (km);
- v = Velocidade.

Roso e Martins (2016) advertem que ciclos de velocidade colhidos em condições reais de tráfego demonstram padrões e condições de direção muitas vezes distintas daquelas adotadas em circuitos padrões de avaliação, o que pode resultar em distorções nas estimativas de emissões e por consequência impactar na elaboração de normas de regulação. Por isso, a adoção de ciclos de velocidades mais próximos aos reais pode auxiliar no aumento de precisão das estimativas e por consequência na avaliação da implementação de novas tecnologias e políticas com vistas a redução de emissões.

Além disso, Song *et al.* (2013) afirmam que modelos utilizando curvas de consumo podem ser utilizados para o cálculo de consumo de combustível e de emissões durante todo o percurso, permitindo avaliar o impacto ambiental decorrente de medidas que diminuam o consumo e as emissões veiculares.

3.2.2 Construção das curvas de consumo e obtenção das equações de consumo de caminhões graneleiros

Para o desenvolvimento do procedimento proposto no presente trabalho, faz-se necessário obter dados de ciclos de velocidade e consumos de caminhões que percorrem a rota em estudo. Por isso, buscou-se essa informação junto a uma empresa especializada em controle de frota de caminhões. Solicitou-se então dados de caminhões transportadores de grãos por rodovia que compõe o trecho analisado.

A empresa solicitou que não fosse divulgado seu nome por questões de sigilo e por esta mesma razão não pôde informar a tipologia do caminhão e a massa transportada por ele. Portanto, os dados foram entregues de forma tabulada com o cabeçalho apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Cabeçalho da tabela contendo os dados disponibilizados

Dia de coleta do dado	Latitude	Longitude	RPM	Número de identificação do veículo	Velocidade	Consumo de combustível
-----------------------	----------	-----------	-----	------------------------------------	------------	------------------------

A empresa forneceu dados de 5.292 caminhões ao longo dos meses de fevereiro a agosto de 2021. Porém, nem todos os veículos possuíam uma vasta quantidade de dados ou percorriam o trajeto de interesse de forma satisfatória. Por isso, o primeiro tratamento realizado foi elencar quais eram os veículos com maior quantidade de registros por rodovia.

Após isso, selecionou-se os 5 veículos com maior quantidade de registros de cada rodovia e analisou-se os dados dia a dia na busca daqueles que tivessem pontos de registro cobrindo todo o trecho da rodovia distribuídos da forma mais regular possível, no sentido interior-litoral e em um espaço de tempo contínuo. Obteve-se, então, um veículo para cada uma das 3 rodovias analisadas.

Selecionou-se dados do veículo 817120 que percorreu o trecho de 649,5 km da BR-163 entre os municípios de Sorriso e Rondonópolis no sentido interior-litoral, nos dias 20 e 21 de fevereiro de 2021. Já para a BR-364, compreendendo o percurso de 1.229,0 km indo de Rondonópolis até seu entroncamento com a BR-050, selecionou-se dados do caminhão 818555 nos dias 19, 20 e 21 de março de 2021. Por fim, para o veículo 356271 que percorreu os 232,9 km do trecho correspondente à BR-050, considerou-se dados colhidos no sentido interior-litoral entre os dias 14 e 16 de março de 2021.

Após a seleção dos veículos, foi necessário retirar do banco de dados, os registros que apresentaram algum tipo de inconsistência, como a ausência da velocidade ou do consumo. Com os registros restantes, construiu-se a curva de consumo versus velocidade destes caminhões como apresentado nas Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4.

Faz-se importante ressaltar que foram utilizados, para construção das curvas de consumo, todos os registros válidos dos veículos fornecidos pela empresa, inclusive aqueles obtidos fora do período e da rota descritos anteriormente.

As equações de consumo que descrevem as curvas de consumo obtidas para os veículos 817120, 818555 e 356271, foram respectivamente as Equações (3.5), (3.6) e (3.7).

$$FC = 3,5893 * v^{-0,608} \quad (3.5)$$

$$FC = 3,8175 * v^{-0,622} \quad (3.6)$$

$$FC = 2,8823 * v^{-0,487} \quad (3.7)$$

Onde:

- FC = Consumo de combustível (L/km);
- v = Velocidade (km/h).

A Figura 3.2 mostra os valores de consumo médio para cada velocidade desenvolvida pelo veículo 817120 na BR-163 e a curva que melhor descreve o comportamento destes pontos, com um coeficiente de determinação de 0,5392.

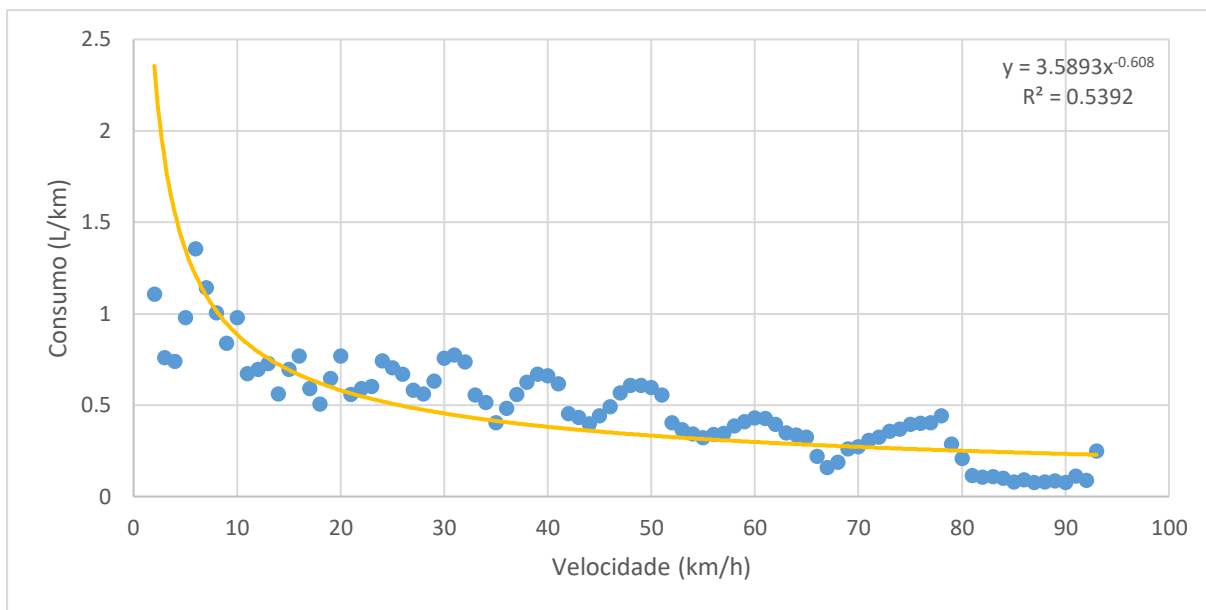


Figura 3.2 - Curva de consumo versus velocidade do veículo 817120 na BR-163

A Figura 3.3 mostra os valores de consumo médio para cada velocidade desenvolvida pelo veículo 818555 na BR-364 e a curva que melhor descreve o comportamento destes pontos, apresentando um coeficiente de determinação de 0,6433.

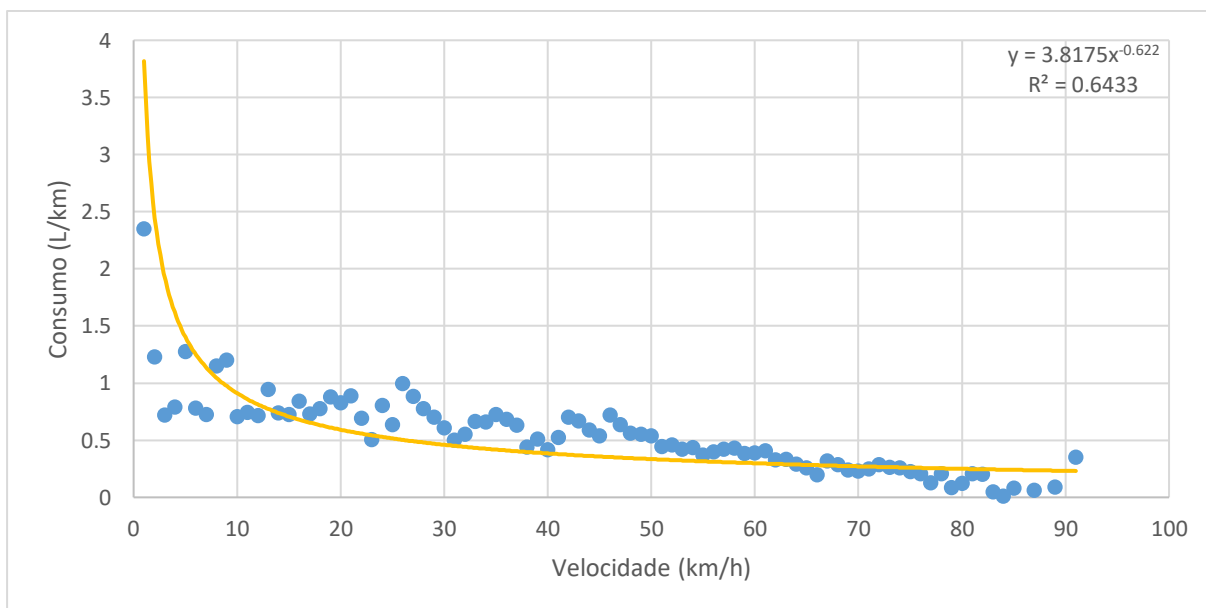


Figura 3.3 - Curva de consumo versus velocidade do veículo 818555 na BR-364

Por fim, a Figura 3.4 mostra os valores de consumo médio para cada velocidade desenvolvida pelo veículo 356271 na BR-050 e a curva que melhor descreve o comportamento destes pontos, possuindo um coeficiente de determinação de 0,4934.

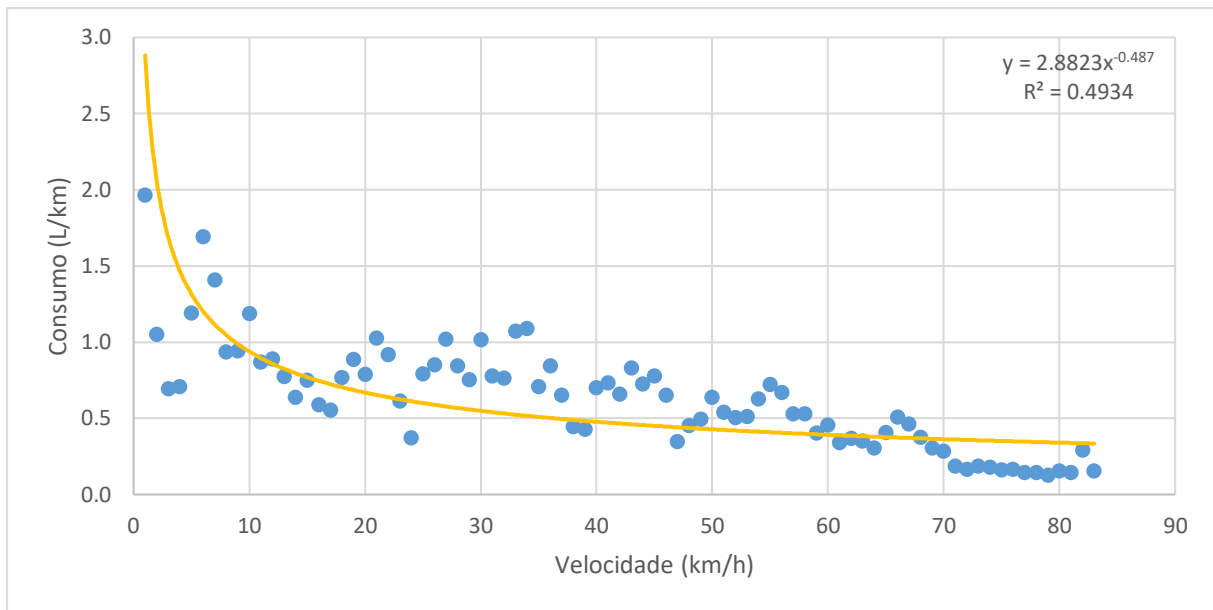


Figura 3.4 - Curva de consumo versus velocidade do veículo 356271 na BR-050

O fluxograma contido na Figura 3.5 apresenta os passos seguidos para o cálculo da estimativa de emissão de CO₂ por meio da metodologia baseada nas equações de consumo de caminhões graneleiros. Algumas das etapas apresentadas na Figura 3.5 serão desenvolvidas no Capítulo 4 desse trabalho.

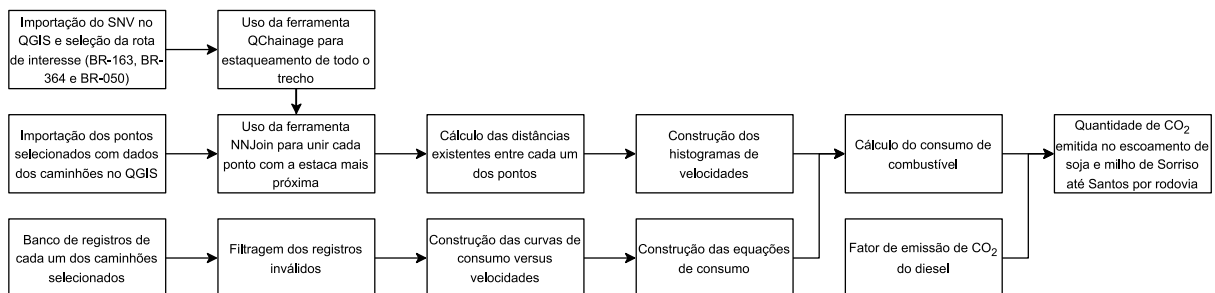


Figura 3.5 - Fluxograma com passos da metodologia baseada nas equações de consumo de caminhões graneleiros

4 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados dos procedimentos e técnicas utilizadas para subsidiar e aplicar as metodologias e ferramenta apresentadas no capítulo anterior no processo de estimativa do consumo de combustível e emissão de CO₂.

4.1 TIPOLOGIA DOS CAMINHÕES BRASILEIROS

No Brasil, conforme dados do Sindicato Nacional da Indústria de Componentes Automotores (SINDIPEÇAS) e da Associação Brasileira da Indústria de Autopeças (ABIPEÇAS), a frota circulante de caminhões em 2021 era de 2.110.811 veículos. Além disso, a idade média deste segmento foi de 11 anos e 11 meses em 2021, sendo que 20,2% desta frota possuía idade de até 5 anos, 51,9% entre 6 e 15 anos e 28% superava os 16 anos de uso (SINDIPEÇAS, 2022).

Já de acordo com dados do Anuário da Indústria Automobilística Brasileira, a frota de caminhões em 2021 era de 2.059.053 veículos, tendo havido neste ano o licenciamento de 128.679 novos veículos, o maior valor desde 2015. Deste valor, destaca-se os caminhões pesados e semipesados que representaram 51,40% e 25% dos novos licenciamentos, respectivamente (ANFAVEA, 2022).

A Figura 4.1 mostra a evolução da frota circulante de caminhões entre os anos de 2012 e 2021 segundo dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) e do SINDIPEÇAS e a Figura 4.2 apresenta a evolução de licenciamentos neste mesmo período segregado entre os tipos de caminhão pesado, semipesado e outros que engloba os do tipo médio, leve e semi leve.

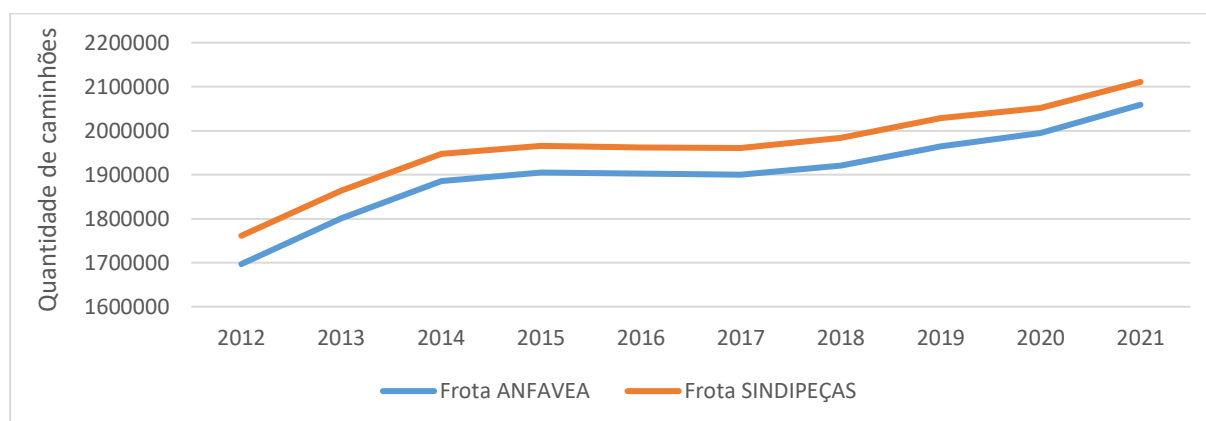


Figura 4.1 - Frota circulante de caminhões nos anos de 2012 a 2021

Fonte: ANFAVEA (2022) e SINDIPEÇAS (2022).

Percebe-se que a frota circulante de caminhões tem crescido continuamente desde 2012 e que a porcentagem de licenciamento de caminhões pesados tem se tornado a maior dentre as três classes contabilizadas pela ANFAVEA desde 2018, sendo responsável por aproximadamente metade dos novos licenciamentos entre 2018 e 2021, contra aproximadamente um terço entre 2012 e 2017.

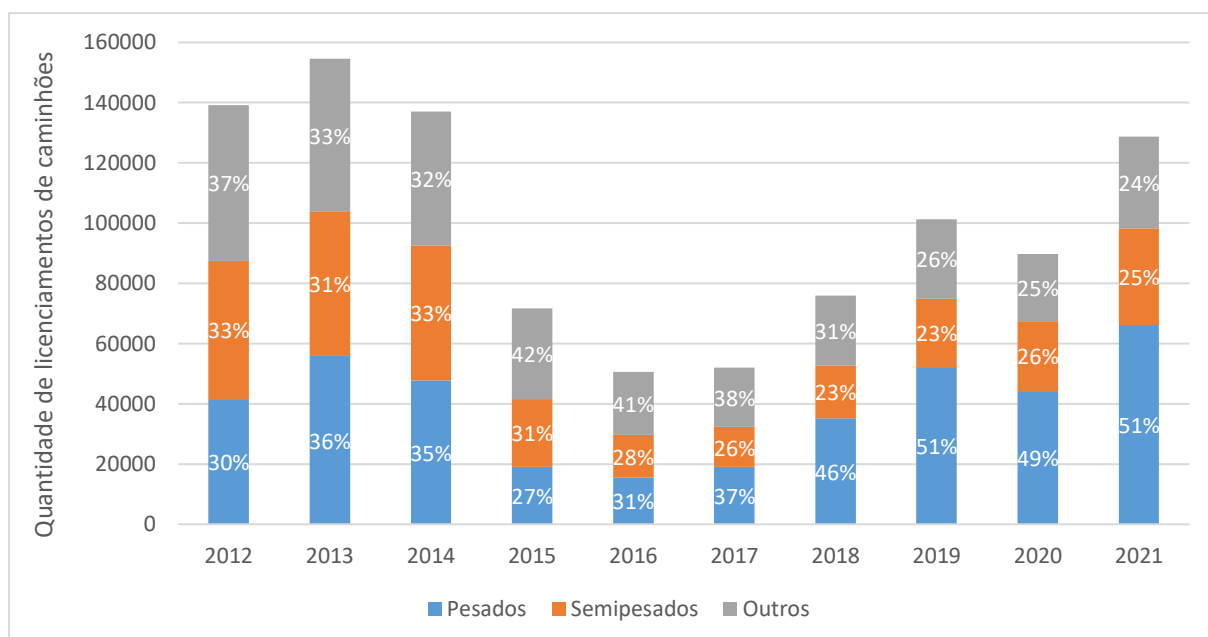


Figura 4.2 - Licenciamento de caminhões nos anos de 2012 a 2021

Fonte: ANFAVEA (2022).

Outra entidade que divulga informações sobre a frota circulante de caminhões é a Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (FENABRAVE) que por sua vez afirma, com base em dados da Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), que a frota circulante de caminhões no Brasil em 2021 era de 3.612.077 caminhões e que a idade média destes veículos é de 21 anos (FENABRAVE, 2021). Estes dois dados são consideravelmente maiores que os indicados pelo SINDIPEÇAS e pela ANFAVEA, porém, conforme indicado por Gonçalves (2016), os dados do SENATRAN, antigo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), contabilizam apenas a entrada de novos veículos no mercado, não levando em conta os que saem do mercado por razões de sucateamento, roubo ou colisão.

O relatório da FENABRAVE aponta ainda que em 2021 o comércio de caminhões cresceu 42,8% como resposta ao crescimento dos setores de agronegócio e de logística e à boa oferta de crédito. Esta evolução só não foi maior por causa da falta de oferta de peças que impediu o atendimento de toda a demanda, fazendo com que parte das entregas fosse agendada para 2022 (FENABRAVE, 2021).

Segundo a CETESB, a frota circulante é composta pelo conjunto de veículos que se acredita estarem circulando e pode ser calculada a partir da venda de veículos novos nos últimos 40 anos deduzindo-se dela a taxa de sucateamento. O órgão afirma ainda que a quantidade de veículos registrados é normalmente maior que a frota circulante pois existem veículos que deixam de circular, mas que não são retirados dos registros dos órgãos de trânsito (CETESB, 2022a).

Dessa forma, utilizou-se a Equação (4.1) recomendada pelo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2014) para o cálculo da taxa de veículos remanescentes do ciclo Diesel. Nela adotou-se $t_0 = 17,0$ e $a = 0,1$ por se desejar obter o valor para caminhões.

$$S(t) = \frac{1}{1 + \exp(a(t - t_0))} + \frac{1}{1 + \exp(a(t + t_0))} \quad (4.1)$$

Onde:

- $S(t)$ = Fração de veículos remanescentes, ainda não sucateados, na idade t ;
- t = Idade do veículo em anos.

O SENATRAN disponibiliza periodicamente dados de veículos registrados no Brasil. Uma das planilhas fornecidas pelo SENATRAN identifica os veículos por classe veicular registrados em cada um dos municípios brasileiros, a partir dela é possível calcular a porcentagem da frota de cada município composta por caminhões (considerando para tal cálculo as classes “caminhão” e “caminhão trator”). Outra planilha do SENATRAN apresenta a frota registrada de cada município por ano de fabricação, sendo possível a partir disso calcular a idade dos veículos. Faz-se importante ressaltar que neste trabalho para o cálculo da idade dos veículos adotou-se primeiramente o ano de fabricação, em seguida o ano de modelo para os veículos que não apresentavam a informação de ano de fabricação e por fim, descartou-se o grupo de veículos que não apresentava nenhuma das duas informações.

Ao se calcular o percentual de caminhões na frota dos municípios reportada pelo SENATRAN em março de 2022 e em seguida aplicar esse percentual na frota por idade e município, obteve-se um total de 3.615.314 caminhões com idade de até 40 anos, ou seja, que foram fabricados a partir do ano de 1982 (SENATRAN, 2022).

Aplicando a Equação (4.1) à frota encontrada, obteve-se que a frota circulante de caminhões no Brasil em março de 2022 era de 2.201.936 caminhões e que a sua idade média era de 11,13 anos, dados compatíveis aos apontados pela ANFAVEA e pela SINDIPEÇAS. A Figura 4.3 mostra a comparação entre os dados de frota circulante por idade obtidos por meio deste procedimento e os informados pelo SINDIPEÇAS. Nela é possível observar que para o SENATRAN a maior parte da frota possui idade de 9 anos (6,61% segundo o SENATRAN e o SINDIPEÇAS), já para o SINDIPEÇAS, a idade mais frequente é a de 11 anos (6,58% segundo o SENATRAN e 7,45% segundo o SINDIPEÇAS).

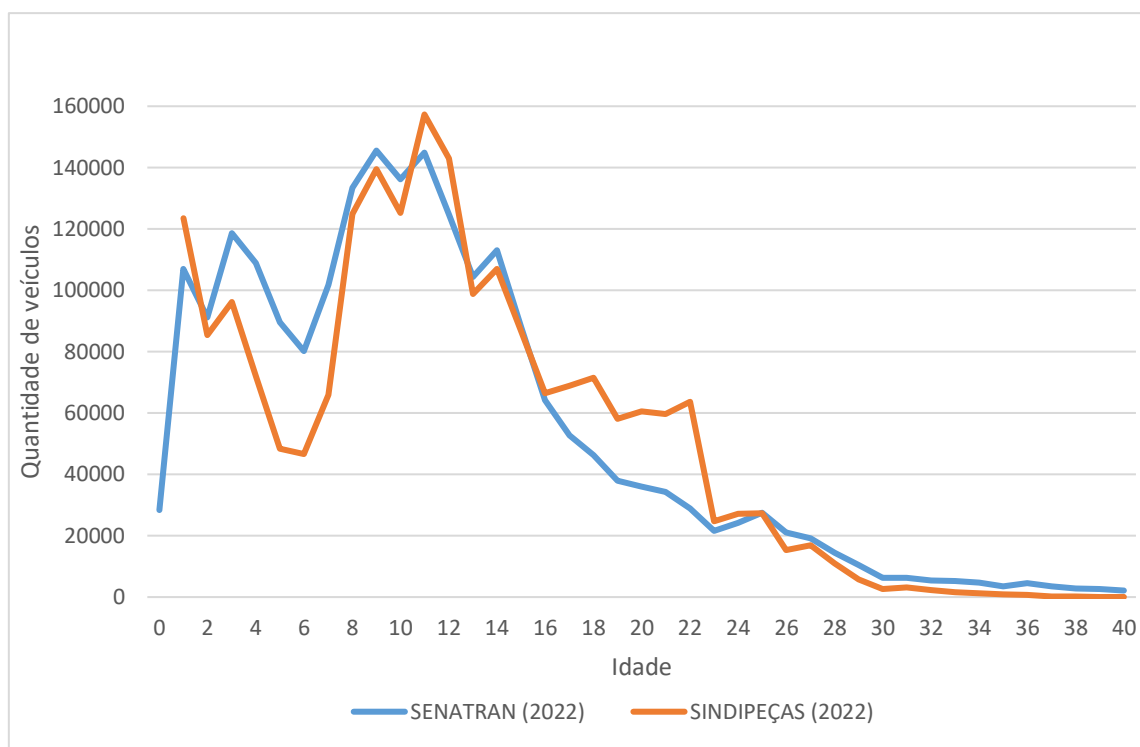


Figura 4.3 - Frota circulante de caminhões por idade em 2022

Fonte: SENATRAN (2022) e SINDIPEÇAS (2022).

Caneppele *et al.* (2021) indicam que os quatro principais tipos de caminhões utilizados para o transporte de grãos são:

1. caminhão silo que contém carroceria apropriada para o transporte de granéis sólidos, com descarga por gravidade, por meio de portinholas que se abrem;
2. caminhão cerealeiro com carroceria própria para transporte de cereais;
3. caminhão graneleiro, que possui carroceria adequada para o transporte de cargas a granel, ou seja, cargas homogêneas, sem disposição especial, em geral grãos e cargas secas;
4. caminhão porta-contêiner que é um facilitador para a circulação e os transbordos, viabilizando a logística do transporte multimodal, o qual evita que ocorram perdas e avarias às cargas, e possibilita uma possível diminuição de mão de obra para movimentação da mercadoria.

Dentre estes caminhões, o mais comum, segundo os autores, é o graneleiro, geralmente com capacidade de 45 toneladas de carga chamado de bitrem. A razão pela sua predileção é a possibilidade de transportar outros tipos de cargas secas, além de grãos (CANEPPELE *et al.*, 2021).

Ao realizarem uma pesquisa de campo entrevistando 35 caminhoneiros no interior de São Paulo, Ponte Júnior e Rotta (2019) relataram que a maior parte dos veículos utilizados por estes motoristas foram fabricados entre 2011 e 2019, 43% deles carregavam graneis e a tipologia

mais frequente foi o bitrem.

Em conformidade com o já exposto, Demetino e Maceno (2017), ao estudarem o ciclo de vida do transporte de soja, adotaram em seu estudo o caminhão do tipo bitrem graneleiro assumindo que o veículo possuía uma capacidade de 57 toneladas e uma capacidade máxima de carga de 36 toneladas. Isso porque 57 toneladas é o Peso Bruto Total Combinado (PBTC) limite para bitrens com comprimento igual ou superior a 17,50 metros permitido pela legislação à época e ainda hoje segundo resolução do Conselho Nacional de Trânsito nº 882 de 2021. Para bitrens com comprimento de até 17,50 metros, o peso bruto total combinado permitido é de 45 toneladas (CONTRAN, 2021).

Biaggioni e Bovolenta (2010), em seu estudo de rotas de escoamento de soja, adotaram para o percurso rodoviário um veículo do tipo caminhão bitrem graneleiro tracionado por cavalo mecânico com tara de 9,5 toneladas e dois semirreboques com tara de 10,7t. A autonomia média de diesel, informado pelos autores, deste veículo é de 2,53 km/L e a capacidade de transporte de carga líquida de 38,5t.

Neste mesmo sentido, Torres *et al.* (2017) adotaram em seu estudo o veículo do tipo bitrem com capacidade de 48 toneladas e caminhão trator da marca Volvo modelo FH 540. Enquanto Martinovic (2015), após analisar uma base de dados cedidos pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) com 173.601 veículos de empresas de transporte dos estados de São Paulo, Amazonas e Amapá, adotou em seu estudo o caminhão trator da marca Volvo modelo FH 440 que possui potência de 440 cavalos (cv) e carga útil de até 40 toneladas.

Já Gândara e Bastos da Cruz (2019) analisaram 198 questionários respondidos por motoristas de caminhão funcionários de transportadores rodoviários de carga e obtiveram que 28,8% destes motoristas dirigiam caminhões com potência de 460 cavalos, 26,3% caminhões com 440 cv e 18,2%, 540 cv.

A partir de dados de balanças localizadas em duas rodovias no estado de São Paulo, Cunha *et al.* (2005) identificaram que 30,6% dos 5.227 caminhões pesados nestas balanças eram caminhões com dois eixos e potência média de 137 cv. Caminhões com 7 eixos e potência média de 381 cv, características da classe bitrem, respondiam a 2,6% dos registros com uma massa média de 43,070 toneladas, porém os autores deram especial atenção ao fato de que um estudo semelhante realizado cinco anos antes, ao estudar 6.744 registros de balanças, não registrou nenhum veículo deste tipo.

Outro estudo que também analisou dados de balanças com uma amostra de 30.839 caminhões, dos quais se anotou a marca e o modelo de 450, realizado por Lima *et al.* (2018), encontrou que a massa média dos caminhões com 7 eixos ou mais era de 58,792 toneladas e a potência média desses veículos era de 438 cv.

Percebe-se então uma evolução na carga e na potência da classe de veículos com 7 eixos ou mais, na qual se insere o caminhão do tipo bitrem, tendo esta classe se quer sido identificada em um primeiro estudo datado do ano 2000, teve sua massa média acrescida em 36,5% e sua potência média aumentada em 15,0% entre os estudos de Cunha *et al.* (2005) e Lima *et al.* (2018).

Os caminhões do tipo bitrem, como observado nos estudos, são veículos que comumente possuem um PBTC superior a 40 toneladas quando carregados, o que os classifica como caminhões pesados segundo a classificação utilizada pela CETESB. O Quadro 4.1 apresenta a definição das categorias de veículos adotadas pela CETESB (2022a).

Quadro 4.1 - Definição das categorias de veículo

Categorias	Motor/Combustível	Definição
Automóveis	Otto	Gasolina C
		Etanol Hidratado
		Flex-fuel
Comerciais Leves	Otto	Gasolina C
		Etanol Hidratado
		Flex-fuel
	Diesel	
Motocicletas	Otto	Gasolina C
		Flex-fuel
Caminhões Semileves (3,8 t < PBT < 6 t)	Diesel	Veículo automotor destinado ao transporte de carga, com carroceria, e PBT superior a 3.856 kg
Caminhões Leves (6 t <= PBT < 10 t)		
Caminhões Médios (10 t <= PBT < 15 t)		
Caminhões Semipesados (15 t <= PBT e PBTC < 40 t)		
Caminhões Pesados (15 t <= PBT e PBTC >= 40 t)		
Ônibus Urbanos	Diesel	Veículo automotor de transporte coletivo dentro do município, de uso intermunicipal nas regiões metropolitanas e os midi-ônibus
Micro-ônibus		Veículo automotor de transporte coletivo com capacidade para até vinte passageiros para uso urbano, intermunicipal ou rodoviário, incluindo os mini-ônibus
Ônibus Rodoviários		Veículo automotor de transporte coletivo para transporte entre municípios, interestadual, internacional, turismo, fretamento e os especiais

Fonte: CETESB (2022a).

Notas: PBT - Peso Bruto Total, PBTC - Peso Bruto Total Combinado, (1) – Resolução CONAMA (15/1995) (CONAMA,1995).

Dados da ANTT informando volume de tráfego total nas praças de pedágio apontam que em 2021 o tráfego na BR-163 no Mato Grosso era composto majoritariamente por veículos com 9 eixos (16,69% da contagem total), seguido por aqueles com 6 eixos (14,57%) e em terceiro pelos com 7 eixos (6,80%), estes três conjuntos de caminhões responderam juntos por 38,1% do total de veículos que trafegaram pelas praças de pedágio desta rodovia em 2021 (ANTT, 2022).

Outra fonte de dados de contagem de tráfego é o Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) que em sua modelagem de 2020 apresentou que a maior frota de caminhões contados na BR-163 no Mato Grosso possuía 6 eixos (12,59% do total de tráfego) e a segunda maior contava com 7 eixos (11,98%) (DNIT, 2021).

Além disso, o PNCT também realizou um estudo amostral entre 2016 e 2017. Esse estudo apontou que 15,28% dos caminhões que circulam nas rodovias brasileiras transportam graneis sólidos como pode ser visto na Tabela 4.1. Tal informação demonstra a importância que o transporte de grãos tem nos deslocamentos rodoviários de carga.

Tabela 4.1 – Tipos de carga transportadas por caminhões

Tipo de carga	Porcentagem
Vazio	41,83%
Carga embalada	25,30%
Graneis sólidos	15,28%
Carga sólida (peças e volumes)	7,49%
Graneis líquidos	4,11%
Carga frigorífica	3,35%
Cargas vivas	0,95%
Outros produtos	1,69%

Fonte: Pesquisa Origem-Destino do PNCT (DNIT, 2017).

Já com relação ao tipo de caminhão, o trabalho amostral indicou que 39,27% dos caminhões possuem semirreboque como pode ser verificado na Tabela 4.2, sendo este o caso da tipologia bitrem que possui dois semirreboques.

Tabela 4.2 - Tipos de caminhão

Tipo de caminhão	Porcentagem
Leve	46,06%
Semirreboque	39,27%
Semirreboque especial	13,84%
Reboque	0,83%

Fonte: Pesquisa Origem-Destino do PNCT (DNIT, 2017).

Por fim, segundo o mesmo estudo, 12,75% dos caminhões são do tipo graneleiros, conforme apontado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Tipos de carroceria de caminhões

Tipo de carroceria	Porcentagem
Baú simples	32,92%
Aberta	23,83%
Graneleiro	12,75%
Tanque	6,35%
Baú frigorífico	5,98%
Basculante	4,70%
Sider	3,28%
Silo	1,31%
Cegonha	0,96%
Porta-contêiner	0,90%
Florestal	0,60%
Bebidas	0,32%
Canavieiro	0,23%
Outros	5,89%

Fonte: Pesquisa Origem-Destino do PNCT (DNIT, 2017).

Nota: Dados provenientes de entrevistas de origem e destino (pesquisa amostral) realizadas na Pesquisa Nacional de Tráfego (PNCT) em 2016 e 2017.

A Figura 4.4 ilustra e compara os resultados de contagem de tráfego obtidos a partir de dados da ANTT e do PNCT.

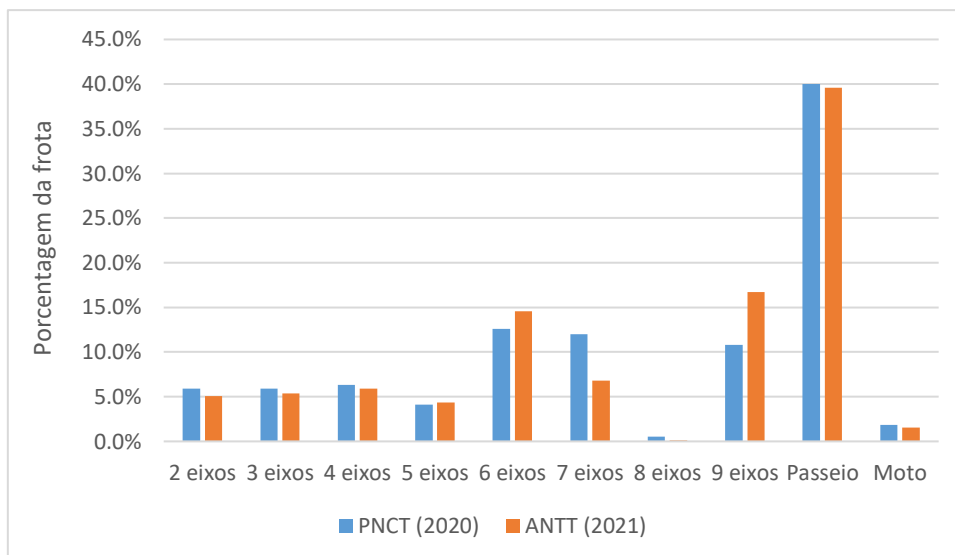


Figura 4.4 - Composição percentual da frota da BR-163 no MT por classe de veículo
Fonte: DNIT (2021) e ANTT (2022).

Como observado por estudos anteriores, o caminhão do tipo bitrem é um dos modelos mais utilizados para o transporte de grãos. Além disso, conforme os dados de contagem de tráfego, caminhões com 7 eixos (dentre os quais se encontra o bitrem) são muito comuns na principal rodovia de transporte de soja e milho do estado do Mato Grosso e que passa pelo município de Sorriso. Por isso, decidiu-se por adotar esta classe de caminhão para a realização dos cálculos de estimativa de consumo de combustível e emissão de CO₂. Acrescenta-se que o PBTC adotado será de 57 toneladas, tendo o cavalo mecânico potência de 440 cavalos e massa de 9,5 toneladas e os dois semirreboques terão uma tara de 10,7 toneladas, restando uma capacidade de transporte de 36,8 toneladas de grãos.

Tabela 4.4 - Autonomia de caminhões pesados do ciclo Diesel por ano de fabricação

Ano	Fase Proconve	Autonomia (km/L)
Até 1999	P2/P3/P4	3,450
2000 – 2001	P3/P4	3,450
2002 – 2003	P4	3,450
2004 – 2005	P4/P5	3,450
2006	P4/P5	3,448
2007	P4/P5	3,448
2008	P5	3,448
2009	P5	3,448
2010	P5	3,448
2011	P5	3,448
2012	P7	3,610
2013	P7	3,610
2014	P7	3,610
2015	P7	3,610
2016	P7	3,610
2017	P7	3,610
2018	P7	3,610
2019	P7	3,610
2020	P7	3,610

Fonte: Tabela de FE da CETESB referente ao relatório de emissões veiculares de 2020 (CETESB, 2020b).

Para definir a autonomia deste veículo recorreu-se aos dados de autonomia de veículos pesados do ciclo Diesel estabelecidos pela CETESB e que é posto conforme a idade do veículo. Os valores são apresentados na Tabela 4.4 e percebe-se que eles são maiores que o apresentado por Biaggioni e Bovolenta (2010), porém por se tratar de uma fonte com maior tradição em estudos de emissão de gases poluentes no Brasil e por possuírem uma maior base de dados, segmentados por ano de fabricação dos veículos, optou-se por adotar os valores fornecidos pela CETESB. Destaca-se que para os anos de 2021 e 2022 adotou-se o valor de autonomia igual a 3,61 km/L por ser esta a autonomia característica da fase P7 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), ainda vigente em 2022 para modelos já registrados (CONAMA, 2018).

4.2 FATOR DE EMISSÃO DE CO₂

Como explicado por Ribeiro *et al.* (2003), os combustíveis são utilizados no setor de transportes por motores de combustão interna que os misturam com oxigênio (O) e após o processo de queima, geram dióxido de carbono (CO₂). Dessa forma, as quantidades de energia gerada e de CO₂ emitida pela reação, dependem da quantidade de carbono (C) existente no combustível.

O Diesel é identificado pela CETESB (2020a) e pela Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS (2021), como sendo um combustível derivado do petróleo e formado principalmente por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos. Dessa forma, a Equação (3.5) apresenta uma reação química de queima de diesel (C₁₀H₂₂) e a Tabela 4.5, as massas molares dos elementos contidos na Equação (3.5).

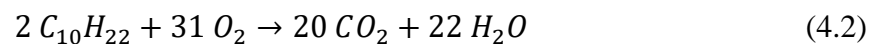


Tabela 4.5 - Massa molar dos elementos

Elemento	Massa molar
Carbono (C)	12
Hidrogênio (H)	1
Oxigênio (O)	16
Diesel (C ₁₀ H ₂₂)	142
Dióxido de Carbono (CO ₂)	44

A partir da Equação (3.5), tem-se que com 284 kg de diesel, obtêm-se 880 kg de CO₂. O que quer dizer que existe uma razão de 3,099 kg CO₂ gerado para cada kg de diesel consumido. Dessa forma, ao considerar a massa específica do diesel como sendo de 0,84 kg por litro, conforme a Agência Nacional do Petróleo (ANP) (2021a), encontra-se uma taxa de 2,603 kg de CO₂ para cada litro de diesel consumido.

Segundo a CETESB, fator de emissão é a massa de um poluente emitida por veículos ao percorrer certa distância ou ainda por motores ao realizar certo trabalho (CETESB, 2022b). Porém, no caso do CO₂, é comum se encontrar o fator de emissão como a taxa de massa desse gás emitida por litro de combustível consumido. Isso se deve ao fato de que a emissão de CO₂ está diretamente conectada com o consumo de combustível, pois considera-se que todo carbono presente no combustível formará CO₂ (RICARDO-AEA, 2014).

Existe na literatura diversos fatores de emissão de CO₂ para o diesel. Porém, eles costumam circular por volta do valor de 2,6 quilogramas de CO₂ para cada litro de diesel consumido. Exemplos são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Fatores de emissão para CO₂

Fonte / Ano	FE (kgCO ₂ / litro de diesel)
VECTO	2,61668
Branco <i>et al.</i> (2022)	2,591
Ribeiro <i>et al.</i> (2003)	2,688
Song <i>et al.</i> (2013) ¹	2,6085
CETESB (2022b) ²	2,594
RICARDO-AEA (2014) ³	2,657
MMA (2014) ⁴	2,603

Nota: 1) Para encontrar o FE deste trabalho, foi preciso plotar a reta de tendência entre os valores encontrados a partir da curva de consumo com os encontrados a partir da curva de emissão para a mesma velocidade. 2) Valor referente ao ano de 2021. 3) Valor referente ao ano de 2010 em diante. 4) Valor referente aos anos de 2001 a 2012.

Neste estudo, optou-se por utilizar o valor do FE como sendo igual a 2,603, por esse o FE encontrado a partir do cálculo da Equação (3.5) e recomendado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em 2014, além de ter sido mantido pela CETESB como valor padrão até 2018, como pode ser observado na Tabela 3.1.

4.3 QUANTIDADE DE SOJA E MILHO A SER TRANSPORTADA E NÚMERO DE VIAGENS NECESSÁRIAS

Um parâmetro importante para estimar o combustível consumido e o CO₂ emitido é a distância percorrida pelos veículos e para isso é importante conhecer duas informações, a distância entre a cidade de Sorriso e o porto de Santos e a quantidade de soja e milho a ser transportada para se estimar quantas viagens serão necessárias. Conforme o Google Maps, a distância entre estes dois pontos pela rota de estudo selecionada é de aproximadamente 2.037 km.

A Figura 4.5 apresenta o trecho de estudo, composto pelas BR-163 pintada em verde, BR-364 colorida em azul e a BR-050 representada pela cor vermelha.

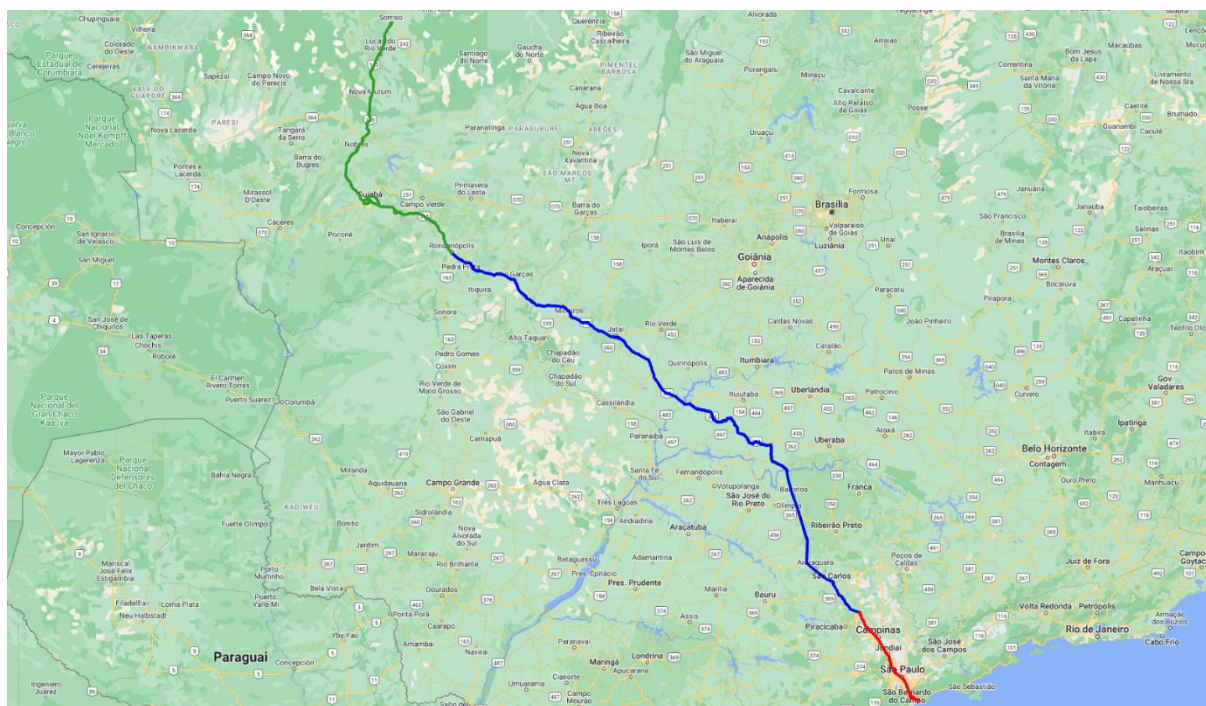


Figura 4.5 - Rota entre o município de Sorriso-MT e o porto de Santos-SP pelas BR-163, BR-364 e BR-050

A quantidade de viagens necessárias para transportar toda a soja e o milho produzidos pelo município de Sorriso com destino à exportação pelo porto de Santos será igual à massa desses grãos dividido pela capacidade máxima de carga do veículo tipo escolhido, ou seja, do caminhão bitrem.

Para determinar a massa de grãos que deve ser transportada é preciso definir a massa de grãos produzida em Sorriso que terá como destino o porto de Santos. Para isso adotou-se que a porcentagem de grãos produzidas pelo município com destino à exportação será a mesma do estado ao qual pertence (Mato Grosso). Também se adotou que a porcentagem de grãos exportados pelo município por meio do porto de Santos foi a mesma apresentada pelo estado em 2014 segundo o relatório da CNT (2015). Esses dados são apresentados na Tabela 4.7, de onde conclui-se que no total serão transportadas 1.556.390 toneladas de grãos de Sorriso ao porto de Santos. Portanto, o esforço necessário é de 3.170.366.430 Toneladas por Quilômetro Útil (TKU).

Tabela 4.7 - Produção e exportação de Sorriso conforme dados de 2020

	Produção Sorriso (t) (2020)	Produção MT exportada (2020)	Exportação Sorriso (t)	Exportação MT pelo porto de Santos (2014) ¹	Exportação Sorriso pelo porto de Santos (t)	Deslocamento por meio de rodovias (2012) ²	Exportação Sorriso pelo porto de Santos e transportada inteiramente por modo rodoviário (t)
Soja	2.283.300	62,90%	1.436.229	55,50%	797.107	80,00%	637.686
Milho	3.190.928	64,84%	2.069.152	55,50%	1.148.379	80,00%	918.704
Total	5.474.228		3.505.381		1.945.486		1.556.390

Nota: 1) Porcentagem adotada segundo o relatório da CNT de 2015 par a exportação de soja, milho e farelo de soja. 2) Porcentagem adotada conforme o trabalho de Silva e Marujo (2012)

Tendo cada caminhão tipo a capacidade de transportar 36,8 toneladas, como já dito anteriormente, obtém-se que serão necessárias 42.294 viagens para realizar esse transporte.

4.4 ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE CO₂ POR TONELADA DE SOJA E MILHO CONFORME A METODOLOGIA *BOTTOM-UP*

A partir da distribuição das 42.294 viagens pela composição da frota de caminhões em circulação por idade é possível estimar quantos caminhões fabricados em cada um dos anos entre 1982 e 2022 realizaram esse trajeto.

A Tabela 4.8 apresenta a distribuição das viagens necessárias por classe de idade da frota de caminhões em circulação. A partir disso, e conhecendo a autonomia destes veículos, é possível calcular o combustível consumido ao realizarem essas viagens e por consequência a emissão de CO₂ com base no Fator de Emissão deste gás para o diesel que foi adotado como sendo igual a 2,603 kg de CO₂ por litro consumido. Este é o FE referente ao ano de 2018 segundo a CETESB, como pode ser observado na Tabela 3.1, e a adoção desse valor deu-se em decorrência de ser este o ano mais recente para o qual a CETESB publicou o FE de CO₂ para este combustível, além disso é o mesmo FE apresentado entre os anos de 2001 e 2018.

Após a realização do procedimento indicado, obteve-se que em média foram consumidos 576,96 litros de diesel por viagem, o que corresponde a um consumo de 28,32 litros para cada 100 km percorridos.

Além disso, foram emitidos um total de 63.518.533,30 kg de CO₂ no transporte de escoamento de soja e milho produzidos em Sorriso até o porto de Santos. Esse valor corresponde a 40,81 kg de CO₂ para cada tonelada destes grãos transportada, taxa consideravelmente maior que a encontrada por Branco *et al.* (2022) de 21,9 kg de CO₂ por tonelada de soja e milho transportada considerando o cenário de transporte de grãos no Brasil utilizando a rede multimodal existente em 2017.

Tabela 4.8 - Distribuição do número de viagens por caminhões da frota circulante e cálculo do consumo de combustível e da emissão de CO₂

Ano de fabricação	Idade (anos)	Frota circulante (SENATRAM, 2022)	Percentual de composição da frota circulante	Quantidade de caminhões por idade	Autonomia (CETESB, 2020b) (km/L)	Litros de diesel consumidos (L)	Emissão de CO ₂ (Kg)
2022	0	28.438	1,29%	546	3,610	308.213,00	802.278,44
2021	1	106.921	4,86%	2.054	3,610	1.158.834,23	3.016.445,49
2020	2	91.193	4,14%	1.752	3,610	988.371,56	2.572.731,17
2019	3	118.609	5,39%	2.278	3,610	1.285.512,72	3.346.189,60
2018	4	108.825	4,94%	2.090	3,610	1.179.474,41	3.070.171,88
2017	5	89.557	4,07%	1.720	3,610	970.639,77	2.526.575,32
2016	6	80.243	3,64%	1.541	3,610	869.692,83	2.263.810,44
2015	7	101.830	4,62%	1.956	3,610	1.103.653,95	2.872.811,24
2014	8	133.475	6,06%	2.564	3,610	1.446.635,85	3.765.593,12
2013	9	145.547	6,61%	2.796	3,610	1.577.474,80	4.106.166,92
2012	10	136.183	6,18%	2.616	3,610	1.475.982,32	3.841.981,97
2011	11	144.836	6,58%	2.782	3,448	1.643.381,34	4.277.721,63
2010	12	124.734	5,66%	2.396	3,448	1.415.297,86	3.684.020,32
2009	13	104.395	4,74%	2.005	3,448	1.184.519,52	3.083.304,32
2008	14	113.033	5,13%	2.171	3,448	1.282.535,99	3.338.441,19
2007	15	88.129	4,00%	1.693	3,448	999.955,74	2.602.884,79
2006	16	64.246	2,92%	1.234	3,448	728.967,11	1.897.501,39
2005	17	52.645	2,39%	1.011	3,450	597.034,50	1.554.080,79
2004	18	46.191	2,10%	887	3,450	523.842,88	1.363.563,01
2003	19	37.931	1,72%	729	3,450	430.168,73	1.119.729,21

Ano de fabricação	Idade (anos)	Frota circulante (SENATRAN, 2022)	Percentual de composição da frota circulante	Quantidade de caminhões por idade	Autonomia (CETESB, 2020b) (km/L)	Litros de diesel consumidos (L)	Emissão de CO ₂ (Kg)
2002	20	36.053	1,64%	692	3,450	408.868,25	1.064.284,05
2001	21	34.292	1,56%	659	3,450	388.895,38	1.012.294,67
2000	22	28.835	1,31%	554	3,450	327.016,15	851.223,03
1999	23	21.630	0,98%	415	3,450	245.298,93	638.513,11
1998	24	24.249	1,10%	466	3,450	275.000,63	715.826,63
1997	25	27.560	1,25%	529	3,450	312.558,92	813.590,88
1996	26	21.054	0,96%	404	3,450	238.771,35	621.521,82
1995	27	19.116	0,87%	367	3,450	216.786,84	564.296,15
1994	28	14.380	0,65%	276	3,450	163.076,37	424.487,78
1993	29	10.386	0,47%	199	3,450	117.783,59	306.590,68
1992	30	6.364	0,29%	122	3,450	72.176,47	187.875,35
1991	31	6.303	0,29%	121	3,450	71.484,23	186.073,44
1990	32	5.489	0,25%	105	3,450	62.252,61	162.043,56
1989	33	5.320	0,24%	102	3,450	60.332,44	157.045,34
1988	34	4.687	0,21%	90	3,450	53.153,93	138.359,69
1987	35	3.547	0,16%	68	3,450	40.221,35	104.696,16
1986	36	4.598	0,21%	88	3,450	52.140,23	135.721,02
1985	37	3.511	0,16%	67	3,450	39.822,04	103.656,76
1984	38	2.776	0,13%	53	3,450	31.486,28	81.958,79
1983	39	2.698	0,12%	52	3,450	30.595,26	79.639,45
1982	40	2.128	0,10%	41	3,450	24.138,47	62.832,44
	Total	2.201.936	100,00%	42.294		24.402.048,80	63.518.533,03

4.5 SELEÇÃO DOS CICLOS DE VELOCIDADES DOS CAMINHÕES GRANELEIROS E CÁLCULO DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS EM CADA VELOCIDADE

A partir dos dados de velocidade dos veículos selecionados no Tópico 3.2.2 e registrados nas rotas e períodos delimitados neste mesmo tópico, construiu-se o histograma de velocidades de cada um deles para a posterior estimativa do consumo de combustível durante o percurso.

Para construir o histograma de velocidades destes veículos, foi necessário descobrir a distância existente entre cada um dos pontos registrados pela empresa de controle de frotas. Isso porque não foram fornecidos os registros de distâncias percorridas conforme o hodômetro do veículo. Dessa forma, procedeu-se a um tratamento utilizando o programa QGIS conforme descrito a seguir.

Primeiro baixou-se o arquivo no formato *shapefile* do Sistema Nacional de Viação (SNV) versão 202110A do site do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e foi feita a sua importação para o ambiente de trabalho QGIS. Em seguida filtrou-se apenas os trechos pertencentes as BR-163, BR-364 e BR-050 e com a ferramenta chamada QChainage dividiu-se as feições desses trechos em pontos, denominados estacas, espaçados a cada 2 metros. Excluiu-se então os pontos que se encontravam fora da rota desejada e os demais enumerou-se de 1 até 1.055.727 sendo a primeira no litoral santista e última no município de Sorriso. Dessa forma, a BR-050 ficou compreendida entre as estacas 1 e 116.457, a BR-364 entre as estacas 116.457 e 730.970 e a BR-163 entre as estacas 730.970 e 1.055.727.

Após estaquear todo o trecho de interesse, importou-se também para o QGIS os pontos registrados pela empresa dos veículos escolhidos nos dias selecionados. Então utilizou-se a

ferramenta denominada *NNJoin* para unir os pontos coletados pela empresa com a estaca mais próxima existente de cada um deles.

Com este procedimento foi possível determinar a distância entre os pontos com dados dos caminhões e assim, estimar qual a distância percorrida em cada faixa de velocidades, como mostrado nas Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8.

A Figura 4.6 apresenta o histograma de velocidades desenvolvidas pelo veículo 817120 na BR-163.

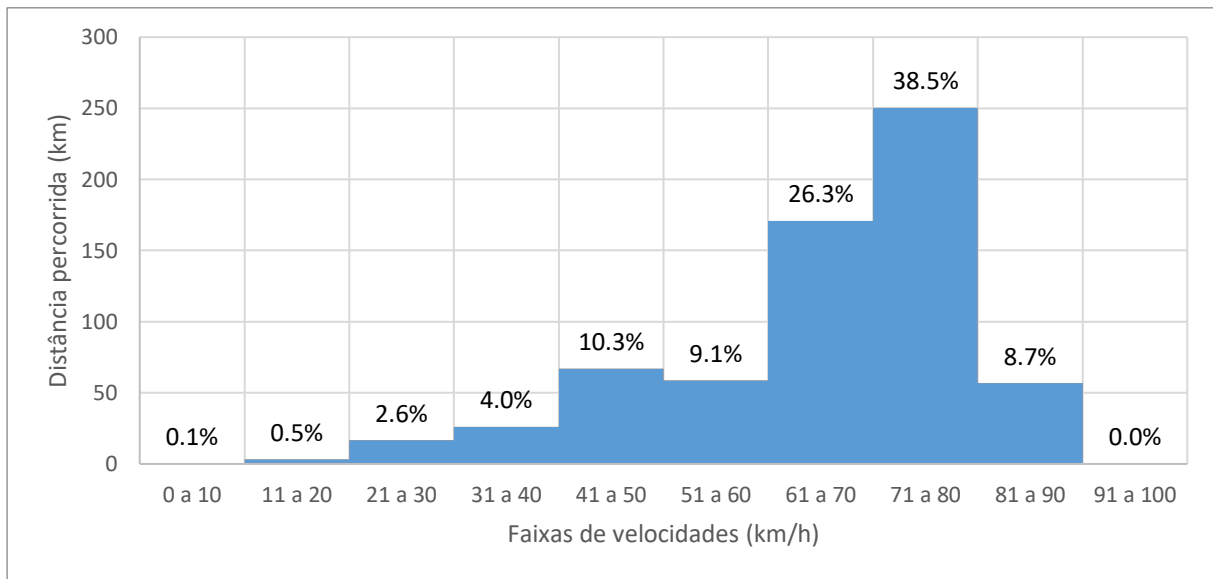


Figura 4.6 - Histograma de velocidades do veículo 817120 na BR-163

A Figura 4.7 apresenta o histograma de velocidades desenvolvidas pelo veículo 818555 na BR-364.

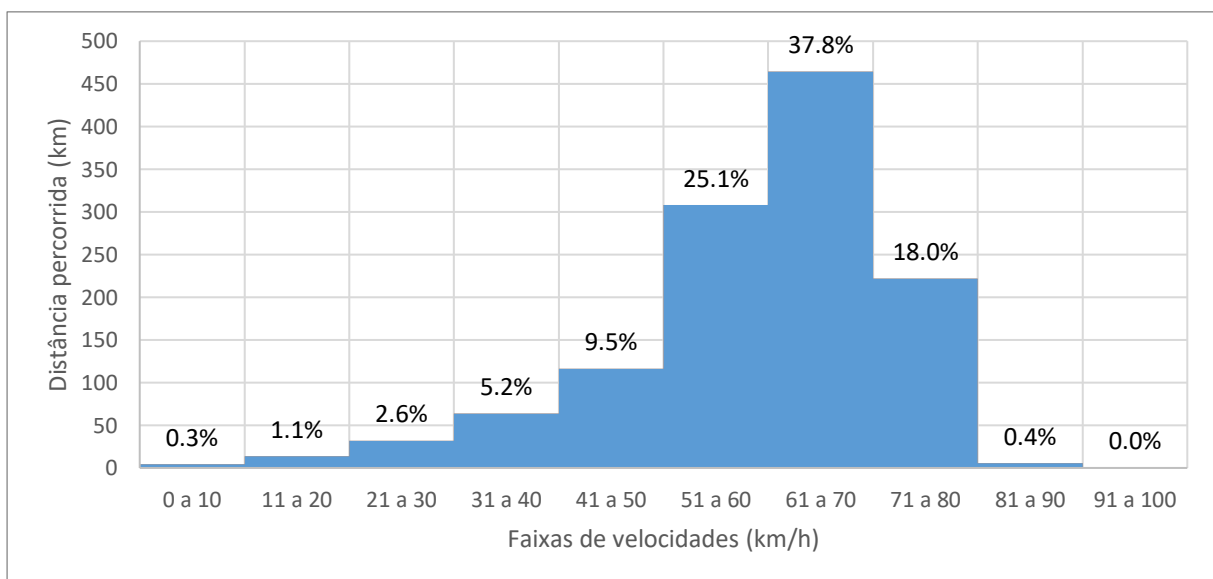


Figura 4.7 - Histograma de velocidades do veículo 818555 na BR-364

Por fim, a Figura 4.8 apresenta o histograma de velocidades desenvolvidas pelo veículo 356271 na BR-050.

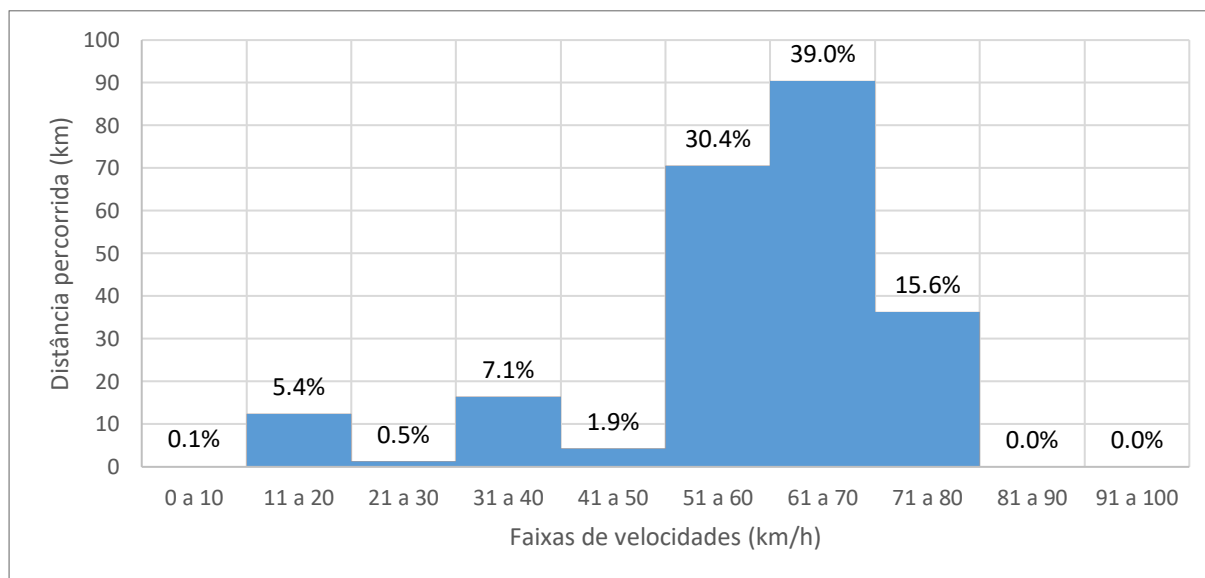


Figura 4.8 - Histograma de velocidades do veículo 356271 na BR-050

A partir da análise das Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8, percebe-se que maiores velocidades foram desenvolvidas no trecho da BR-163, tendo o veículo andado 73,5% do percurso com velocidades acima de 60 km/h, inclusive sendo o único trecho com um percentual expressivo de velocidades acima de 80 km/h. Por outro lado, na BR-050 encontram-se as menores velocidades, com apenas 54,6% do trecho percorrido com velocidades superiores a 60 km/h e uma parte significativa sendo percorrida com velocidades entre 11 e 20 km/h.

4.6 ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE CO₂ POR TONELADA DE SOJA E MILHO CONFORME A METODOLOGIA BASEADA NAS EQUAÇÕES DE CONSUMO DOS CAMINHÕES GRANELEIROS

De posse das equações de consumo de cada um dos veículos e das distâncias percorridas correspondentes a cada uma das velocidades presentes no ciclo de velocidades foi possível calcular o consumo de combustível nos três trechos. Estes consumos são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Consumo de combustível conforme estimativa usando equações de consumo e ciclos de velocidades

	BR-163	BR-364	BR-050	TOTAL
Distância (km)	649,51	1.229,03	232,91	2.111,45
Consumo (L)	189,72	384,02	96,74	670,48
Consumo (L/100km)	29,21	31,25	41,69	31,75

Conclui-se, por meio dessa estimativa, que são necessários 670,48 litros de diesel para que um caminhão realize a viagem de Sorriso ao Porto de Santos. Considerando o mesmo número de viagens adotado no cálculo de consumo por meio da metodologia *Bottom-up*, ou seja, 42.294 viagens, tem-se que são consumidos 28.357.281,12 litros de diesel para o transporte de toda a

soja e milho produzidos em Sorriso com destino à exportação pelo Porto de Santos transportados inteiramente pelo modo rodoviário.

É possível notar, ao analisar a Tabela 4.9 que a BR-163 apresentou o menor consumo médio, sendo esta constatação justificável pelas maiores velocidades desenvolvidas nessa rodovia quando comparada com as demais. Na outra ponta, a BR-050 teve o maior consumo, também coerente com o fato de ser esse o trecho com menores velocidades.

Adotando-se o Fator de Emissão de CO₂ igual a 2,603 kg de CO₂ por litro de diesel, encontra-se que foram emitidos 73.814.002,76 kg de CO₂, ou seja, 47,43 kg de CO₂ para cada tonelada de grãos transportada.

4.7 INTERPOLAÇÃO DAS VELOCIDADES PRESENTES NOS CICLOS DE VELOCIDADES E OBTENÇÃO DO GREIDE E DAS INCLINAÇÕES DAS RODOVIAS ESTUDADAS

Para que o VECTO pudesse seguir os ciclos de velocidades de forma mais fidedigna, decidiu-se por realizar a interpolação dos valores presentes nos ciclos de modo a dispor de velocidades a cada dois metros de percurso. Esse procedimento também foi adotado por Roso e Martins (2016) a fim de diminuir a grande variação de valores entre pontos de medição.

Dessa forma, ao invés de o ciclo apresentar velocidades em apenas algumas estacas das rodovias, todas as estacas passaram a possuir um valor. Esse processo resultou nos denominados ciclos de velocidades para o VECTO que por sua vez diferem dos ciclos de velocidades reais que deram origem a eles após este tratamento, como pode ser observado na Figura 4.9.

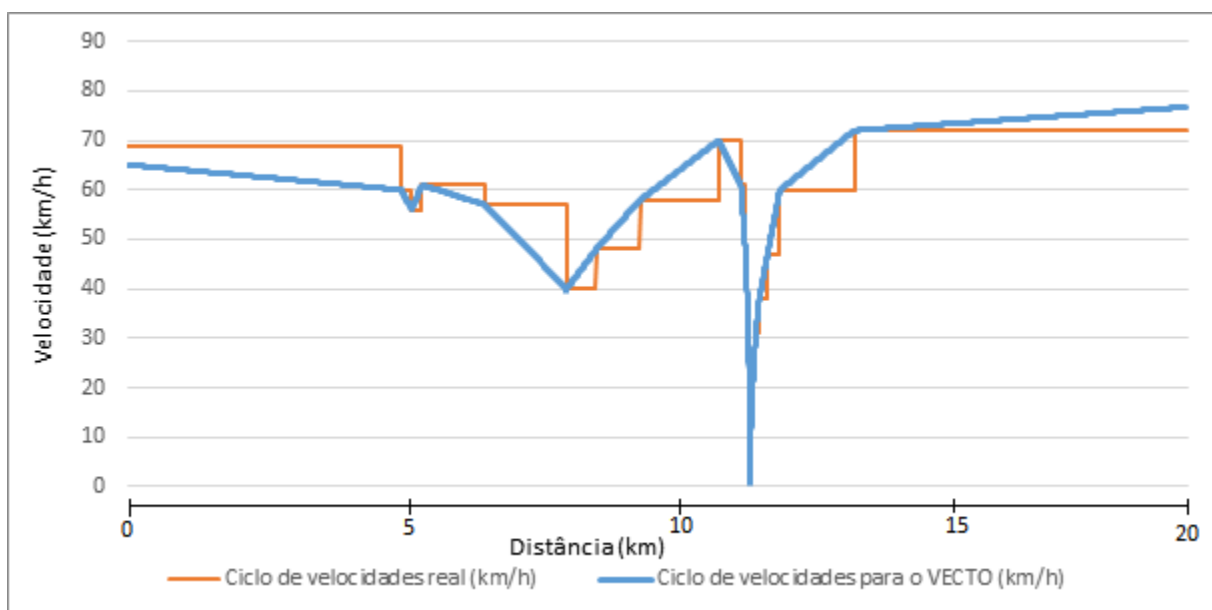


Figura 4.9 - Ciclos de velocidades de trecho de 20 quilômetros da BR-163

Além disso, a fim de tornar a simulação mais realista, também se decidiu por incluir na simulação dados de inclinação percentual do greide das rodovias. Isso, porque como

demonstrado por Dong *et al.* (2020), o perfil de inclinações longitudinais de uma rodovia impacta significativamente no consumo e nas emissões de carbono de caminhões a diesel. Para isso primeiro foi necessário se obter a altimetria de cada estaca dos trechos estudados.

Os dados altimétricos das rodovias estudadas foram obtidos com base em dois procedimentos. O primeiro foi solicitá-los ao DNIT que realiza sua coleta durante os levantamentos de condição do pavimento. Os dados de levantamento do DNIT possuem bom grau de precisão, pois são colhidos em campo a cada metro rodado, porém o órgão só possuía estas informações para uma parte da BR-364. Já o segundo procedimento, que foi realizado para os trechos não contemplados pelo primeiro, consistiu em um levantamento de altimetria por meio de mapas de modelo digital de elevação com dados da Missão Topográfica de Radar Embarcado (SRTM).

Após a adoção dos dois procedimentos dispunha-se de dados de altimetria para cada uma das estacas adotadas nas rodovias estudadas. Entretanto, existiam diferenças de altitudes entre as estacas que se mostravam muito elevados e em alguns pontos impossíveis de condizerem com o de um traçado de rodovia. Por isso, optou-se por tratar os dados de altimetria com o uso do procedimento de média móvel. Dessa forma, a altimetria de uma estaca passou a ser a média da altimetria obtida para esta estaca com as das 500 estacas seguintes.

Mesmo após a adoção do tratamento descrito, os gradientes registrados entre duas estacas ainda variavam muito, por isso também se realizou o procedimento de média móvel com as inclinações nas estacas de modo similar ao realizado com as altimetrias.

Por fim, alguns gradientes ainda apresentavam inclinação superior a 5%, o que não é comum em rodovias como as estudadas. Por isso, adotou-se 5% como sendo a inclinação máxima permitida, substituindo aquelas que porventura fossem maiores.

A Figura 4.10 apresenta exemplo de um trecho de 20 quilômetros da BR-163 sem e com o tratamento de média móvel dos gradientes. É possível notar, com essa comparação, a suavização que a técnica da média móvel possibilita, tornando o greide mais próximo do que seria um real e melhorando o processo de simulação.

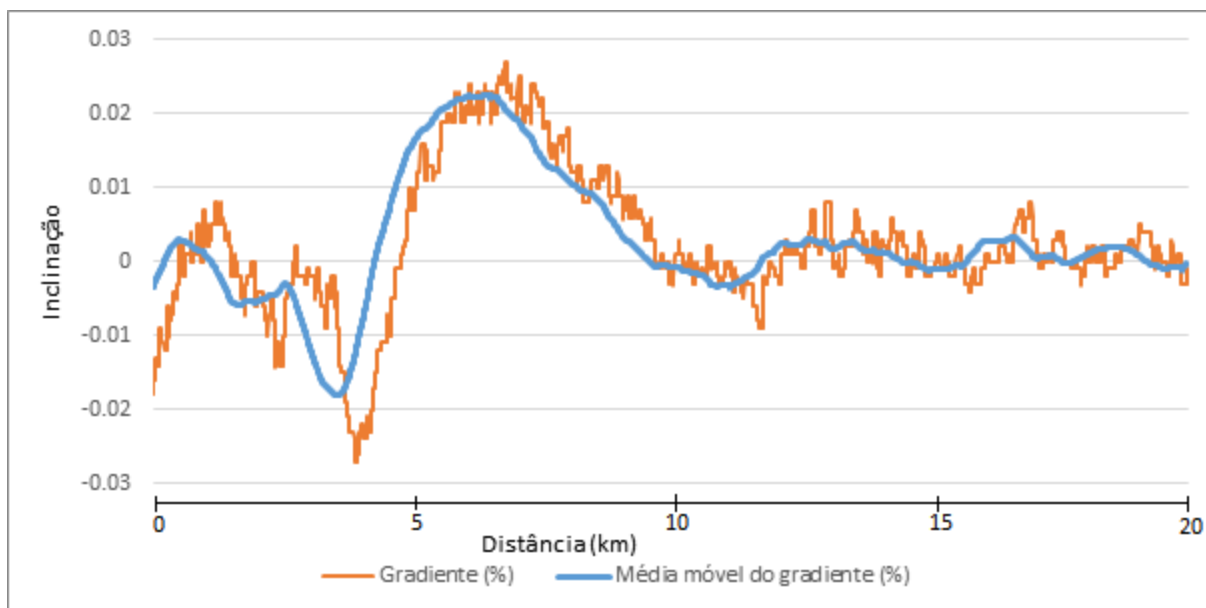


Figura 4.10 - Gradiente de trecho de 20 quilômetros da BR-163 e aplicação da média móvel

Com isso, obteve-se que as inclinações médias dos trechos estudados das BR-163, BR-364 e BR-050 foram, respectivamente, -0,02%, 0,03% e -0,25%. Isso demonstra que a BR-050 é a rodovia com maior inclinação média ao passo que as outras duas apresentam declividades médias próximas da nula, tendo, porém, a BR-364 mostrado uma singela declividade positiva.

Após a realização desse procedimento, decidiu-se por construir o histograma de inclinações de cada um dos três trechos estudados, como pode ser observado nas Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13.

O histograma de inclinações da BR-163 é apresentado na Figura 4.11.

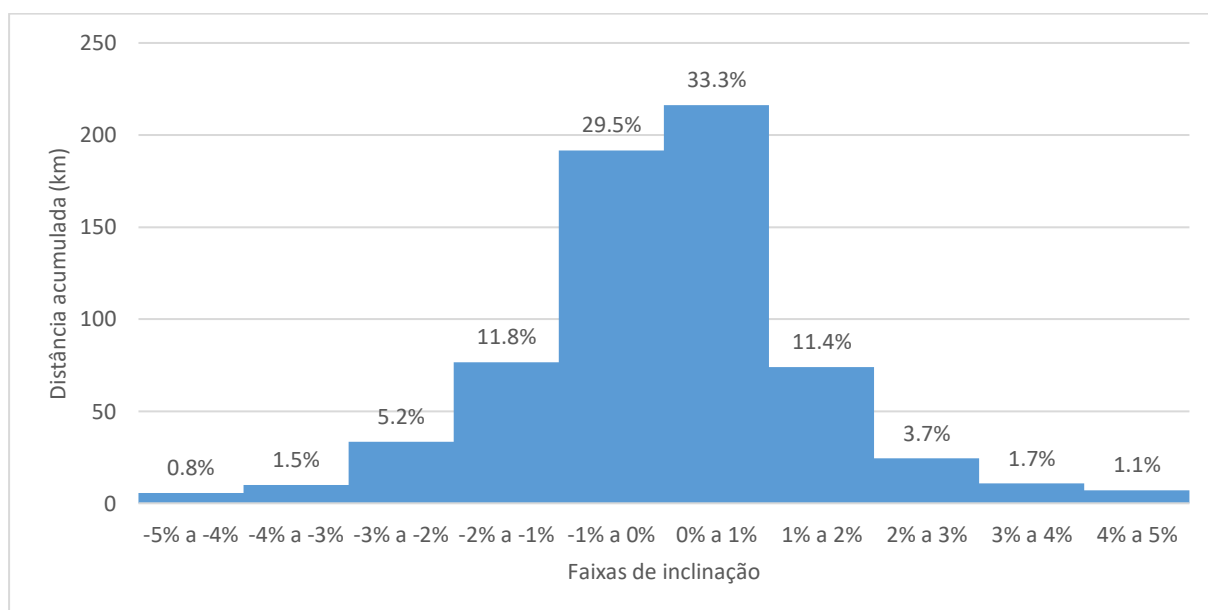


Figura 4.11 - Histograma de inclinações da BR-163

O histograma de inclinações da BR-364 é apresentado na Figura 4.12.

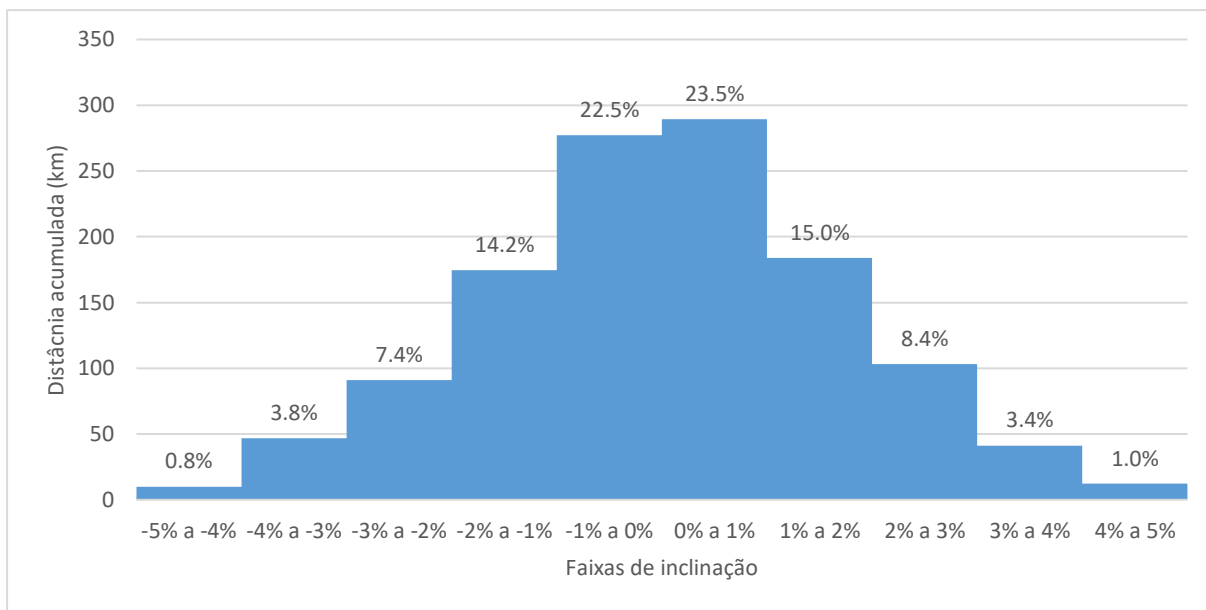


Figura 4.12 - Histograma de inclinações da BR-364

Por fim, o histograma de inclinações da BR-050 é apresentado na Figura 4.13.

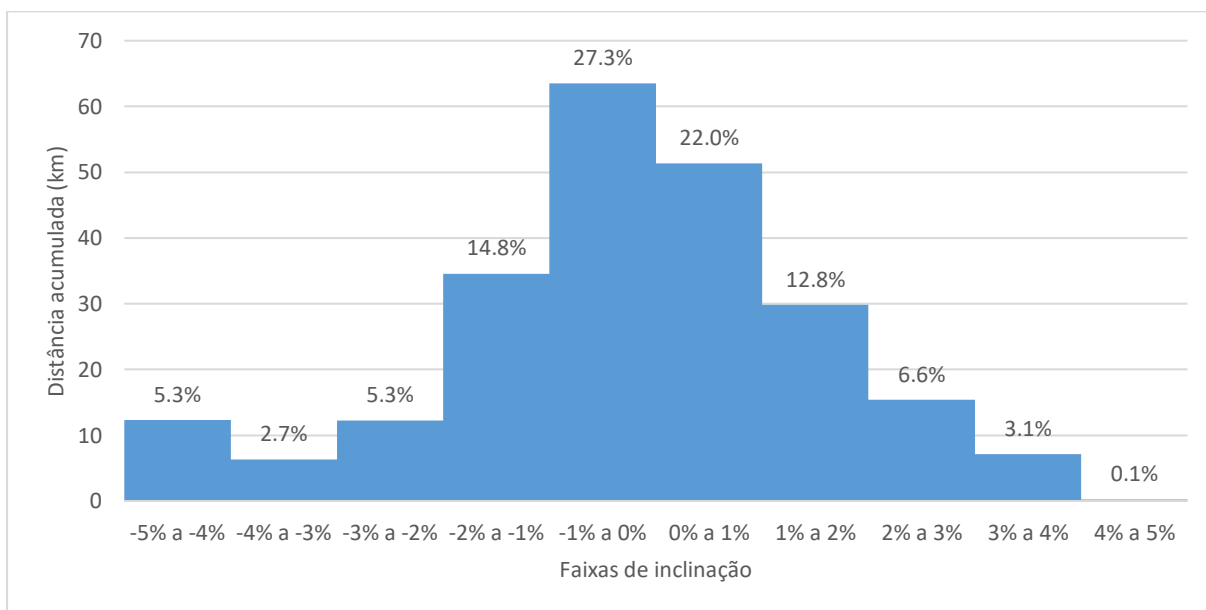


Figura 4.13 - Histograma de inclinações da BR-050

Ao analisar os histogramas de inclinações, percebe-se que a BR-050 apresenta extensão com inclinações entre -5% e -4% consideravelmente superior às outras duas rodovias. Além disso, conclui-se que apenas a BR-050 possui mais da metade de seu trecho (55,4%) com inclinações negativas, enquanto essa condição corresponde a 48,7% e 48,8% das BR-364 e BR-163, respectivamente. Destaque para a BR-163 que apresenta 62,8% de sua extensão com inclinações entre -1% e 1%, e 86,0% entre -2% e 2%, contra apenas 5,1% com inclinações inferiores a -3% ou superiores a 3%, se mostrando ser uma rodovia sem a presença de muitos trechos com elevados aclives e declives.

4.8 CONFIGURAÇÃO DA FERRAMENTA VECTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS PARA EXECUÇÃO DAS SIMULAÇÕES

A Figura 4.14 apresenta as configurações adotadas na ferramenta VECTO para as simulações realizadas neste trabalho. Nela é possível observar que se adotou a caixa de marchas padrão do programa denominada “AMT_12” que possui 12 velocidades e o motor de 325kW denominado “Engine_325kW_12.7I”.

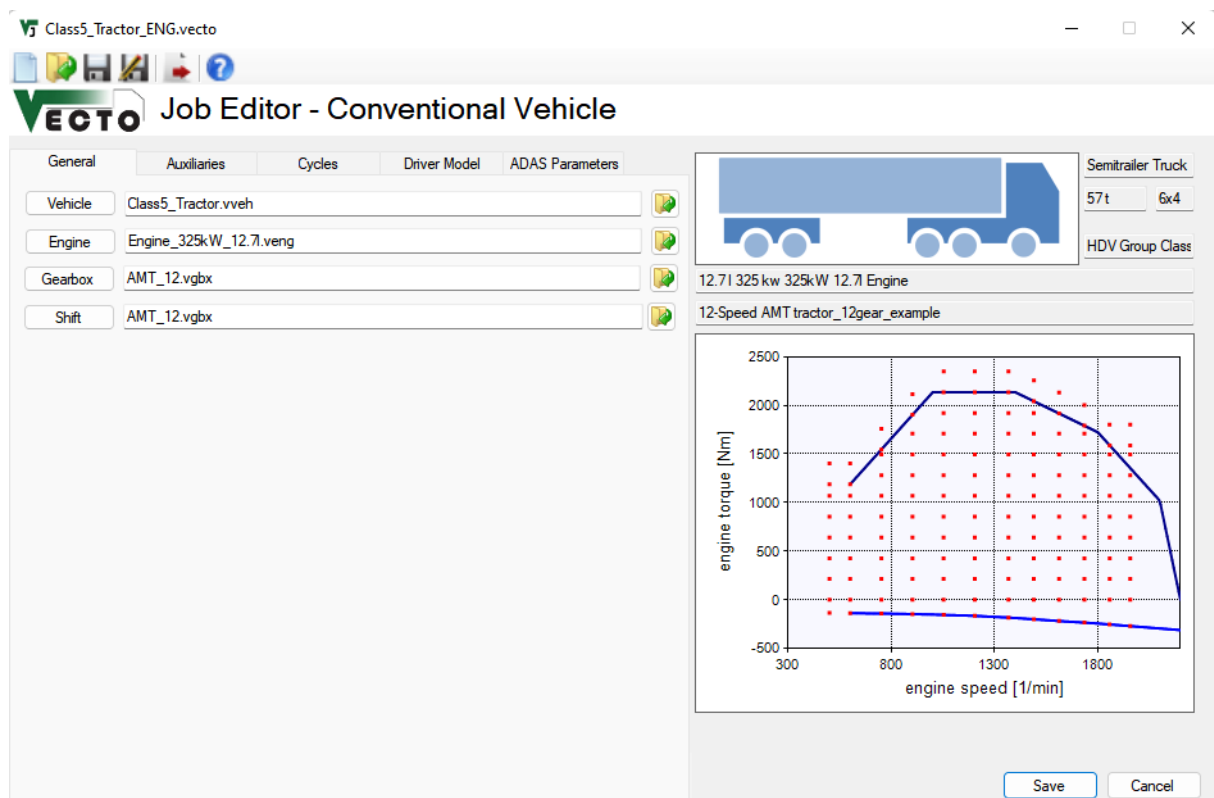


Figura 4.14 - Configurações adotadas na ferramenta VECTO para simulação

As configurações do motor de 325kW são apresentadas na Figura 4.15. Adotou-se esse motor por se tratar do mais potente presente na ferramenta e que, portanto, possui a potência mais próxima dos 440cv do caminhão tipo adotado neste estudo.

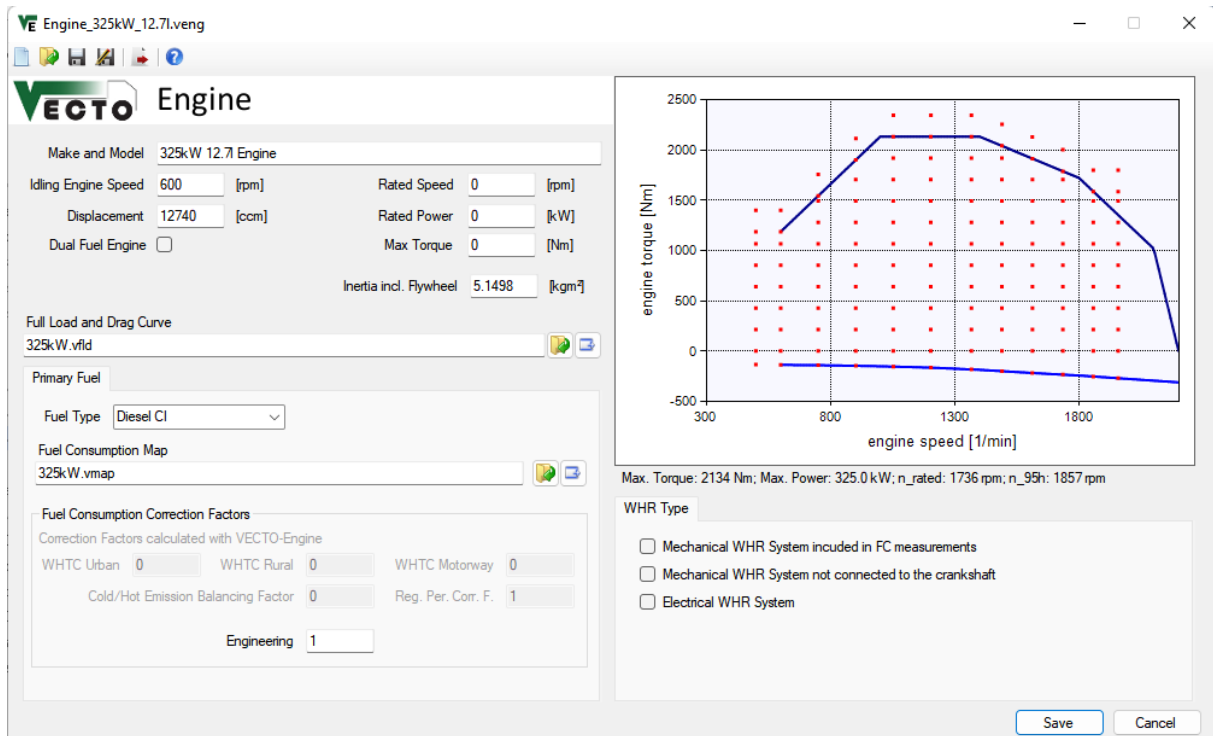


Figura 4.15 - Características do motor de 325kW presente no VECTO

Já com relação ao veículo, adotou-se as configurações apresentadas na Figura 4.16 também de acordo com o caminhão tipo escolhido no Tópico 4.1 deste trabalho.

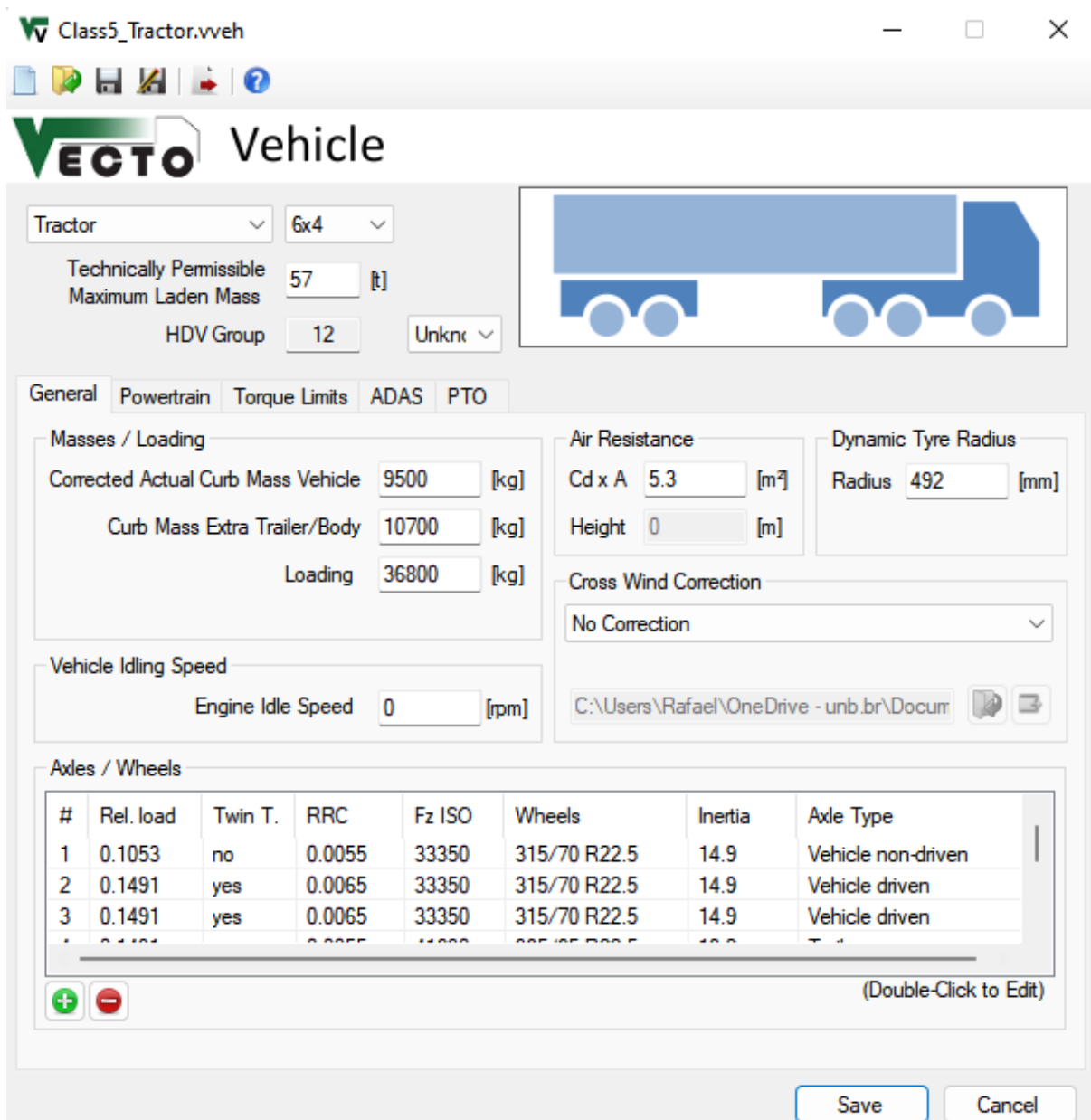


Figura 4.16 - Configuração do veículo adotado nas simulações realizadas no VECTO

Após os procedimentos descritos no Tópico 4.7, os dados encontravam-se prontos para serem inseridos no VECTO e assim executar as simulações. Para inserir os ciclos de velocidades na aba denominada “Cycles” presente na Figura 4.14, é necessário que os dados de distância, velocidades, tempos de parada e gradiente sejam dispostos em um arquivo .csv da forma apresentada na Figura 4.17.

<s> [m]	<v> [km/h]	<stop> [s]	<grad> [%]
0	10	10	2.95
1	20	0	2.97
2	35	0	3.03
3	50	0	2.99

Figura 4.17 - Tabela exemplo de disposição de dados para *input* no VECTO
Fonte: Manual do VECTO.

A Figura 4.18, por sua vez, apresenta os primeiros 40 metros do ciclo de velocidades da BR-364 da forma como foi inserida no VECTO.

	A	B	C	D
1	<s> [m]	<v> [km/h]	<stop> [s]	<grad> [%]
2	0	0	0	1.588739
3	2	5.5	0	1.586448
4	4	11	0	1.584157
5	6	16.5	0	1.581886
6	8	22	0	1.579575
7	10	22.12727	0	1.577265
8	12	22.25455	0	1.574954
9	14	22.38182	0	1.572603
10	16	22.50909	0	1.570253
11	18	22.63636	0	1.567902
12	20	22.76364	0	1.565552
13	22	22.89091	0	1.563161
14	24	23.01818	0	1.560771
15	26	23.14545	0	1.558301
16	28	23.27273	0	1.55585
17	30	23.4	0	1.55342
18	32	23.52727	0	1.55099
19	34	23.65455	0	1.54856
20	36	23.78182	0	1.546089
21	38	23.90909	0	1.54358
22	40	24.03636	0	1.540333

Figura 4.18 - Início do ciclo de velocidades da BR-364 da forma como foi inserida no VECTO

4.9 ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE CO₂ POR TONELADA DE SOJA E MILHO: SIMULAÇÕES REALIZADAS NO VECTO

Após executar as simulações, o VECTO cria dois arquivos com resultados, um com extensão .vsum e outro com extensão .vmod. No primeiro são apresentados diversos parâmetros adotados durante a simulação e alguns resultados de forma geral, como o consumo médio e a emissão

média de CO₂. No segundo, por sua vez, são fornecidos dados detalhados resultantes da simulação, como velocidade alvo que o veículo deveria seguir, velocidade real desenvolvida pelo veículo e consumo instantâneo a cada fração de espaço.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados médios obtidos pelas simulações de cada um dos três trechos estudados.

Tabela 4.10 - Resultados das simulações executadas no VECTO

	BR-163	BR-364	BR-050
Consumo médio de combustível (L/100km)	41,8398	46,6598	43,9935
Emissão média de CO ₂ (g/km)	1.094,814	1.220,937	1.151,17

Dos valores apresentados na Tabela 4.10, obtém-se que são consumidos 947,68 L de diesel por viagem, o que equivale a um consumo médio de 44,88 L/100 km, e emitidos 67,39 kg de CO₂ por tonelada de grãos transportada no percurso. Vale destacar que o VECTO, conforme seu manual, adota o FE de CO₂ igual a 2,61668 kg de CO₂ por litro de diesel consumido e, portanto, ligeiramente maior que o adotado neste trabalho que é igual a 2,603 kg de CO₂ por litro de diesel.

Ao analisar os resultados presentes na Tabela 4.10, nota-se que a BR-163 apresentou o menor consumo médio de combustível, resultado de suas maiores velocidades desenvolvidas, como visto na Figura 4.6, e de seu greide com poucas inclinações acentuadas, como observado na Figura 4.11. A BR-050, por sua vez, respondeu o segundo menor consumo, diferindo, portanto, da ordem encontrada no Item 4.6 deste capítulo. A justificativa é a maior presença de declives acentuados, como mostrado na Figura 4.13, demonstrando a importância e o impacto do greide no consumo dos caminhões.

Já do arquivo de resultados detalhados da simulação, obtém-se os resultados de velocidade real (que nada mais é que as velocidades do ciclo de velocidades inserido no VECTO) e velocidade simulada. A partir disso, é possível verificar o quão fiel ao ciclo de velocidades real a simulação conseguiu ser. Essa análise é importante pois nem sempre o veículo configurado na ferramenta é capaz de seguir as velocidades impostas pelo ciclo verdadeiro.

Para realizar essa análise, calculou-se a diferença absoluta entre a curva do ciclo de velocidades real e a curva do ciclo de velocidades desenvolvida pelo programa. A Figura 4.19 apresenta um exemplo destas duas curvas para um trecho de 40 quilômetros da BR-364, nesse caso o erro encontrado é igual à área existente entre as curvas em laranja (ciclo de velocidades proposto) e em azul (ciclo de velocidades desenvolvido na ferramenta).

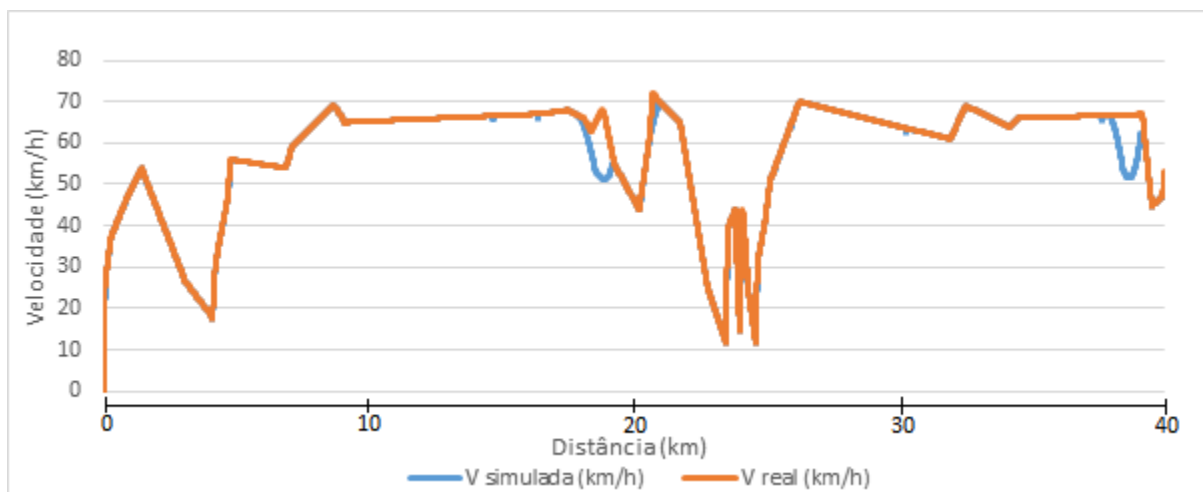


Figura 4.19 - Ciclos de velocidades real e simulado de 40 quilômetros da BR-364

Os erros percentuais entre os ciclos de velocidades alvo e real de cada uma das três simulações são apresentados na Tabela 4.11. Estes erros são resultado da razão entre a área existente entre as duas curvas e a área da curva correspondente ao ciclo real conforme a Equação (4.3).

Tabela 4.11 - Erros percentuais entre os ciclos de velocidades real e simulado

	BR-163	BR-364	BR-050
Erro percentual	1,74%	2,55%	2,27%

(4.3)

$$E_p = \frac{\int_0^l |V_r - V_s| dx}{\int_0^l V_r dx}$$

Onde:

- E_p = Erro percentual;
- V_r = Velocidade real, pertencente ao ciclo de velocidades real;
- V_s = Velocidade simulada, pertencente ao ciclo de velocidades desenvolvido no VECTO;
- l = Comprimento total do percurso.

Os valores de erro percentual apresentados na Tabela 4.11 demonstram que o VECTO foi capaz de simular os ciclos de velocidade com boa precisão.

Também a partir do arquivo que apresenta resultados detalhados, é possível obter o consumo de combustível associado a cada velocidade instantânea desenvolvida, dessa forma, torna-se possível construir curvas de consumo versus velocidade para as velocidades presentes no ciclo de velocidades desenvolvido na ferramenta. Para isso, utilizou-se a massa específica do diesel como sendo igual a 836 g/L, conforme valor referência apresentado no manual do VECTO e que se encontra em concordância com a faixa permitida para a comercialização no Brasil segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2021b) e a ficha de informação técnicas do combustível segundo a PETROBRAS (PETROBRAS, 2021).

As curvas de consumo construídas são apresentadas nas Figura 4.20, Figura 4.21 e Figura 4.22 e as equações provenientes dessas curvas são respectivamente as Equações (4.4), (4.5) e (4.6).

$$FC = 1,6264 * v^{-0,333} \quad (4.4)$$

$$FC = 1,4547 * v^{-0,29} \quad (4.5)$$

$$FC = 0,7975 * v^{-0,249} \quad (4.6)$$

Onde:

- FC = Consumo de combustível (L/km);
- v = Velocidade (km/h).

A Figura 4.20 apresenta a curva de consumo correspondente à simulação da BR-163, que possui um coeficiente de determinação de 0,4941.

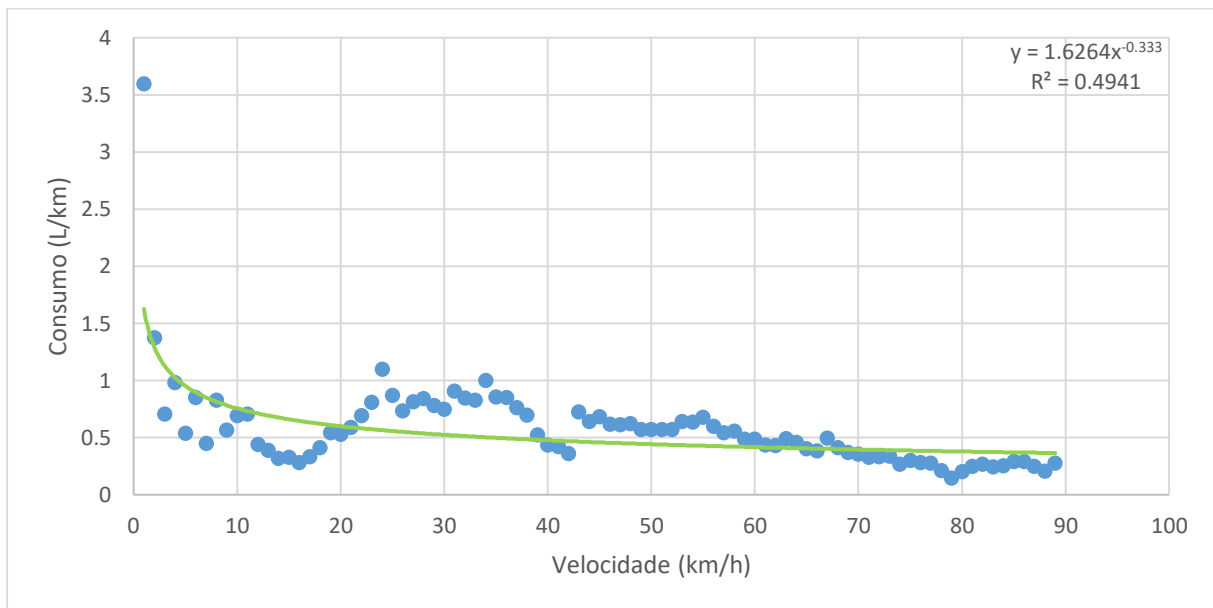


Figura 4.20 - Curva de consumo versus velocidade do VECTO na BR-163

A Figura 4.21 apresenta a curva de consumo correspondente à simulação da BR-364, com um coeficiente de determinação de 0,5211.

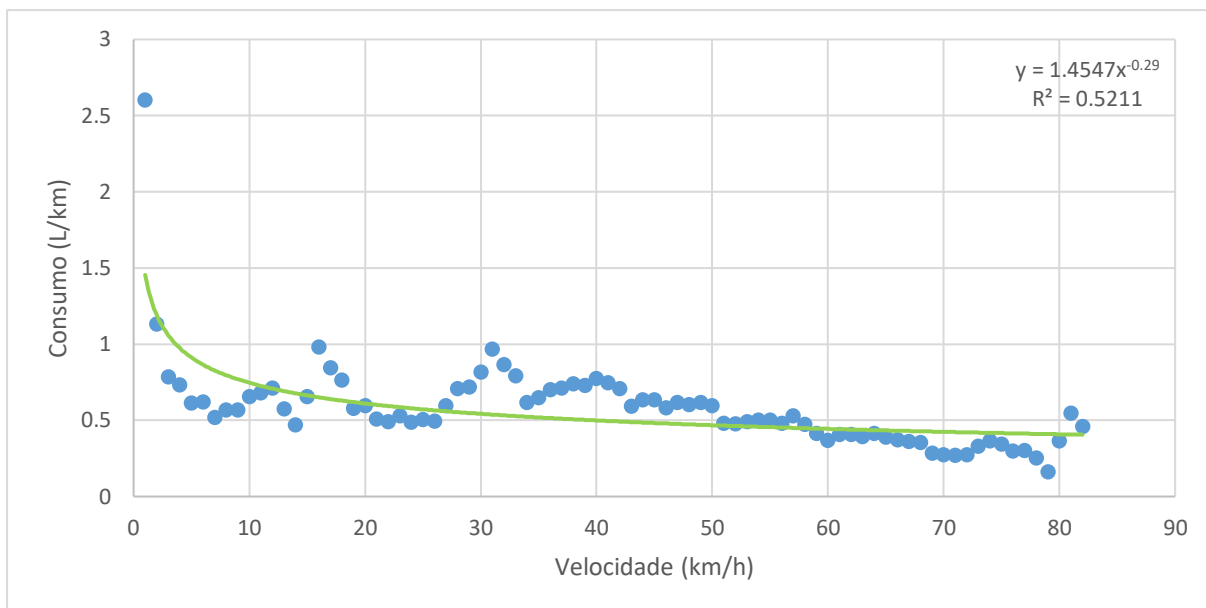


Figura 4.21 - Curva de consumo versus velocidade do VECTO na BR-364

Por fim, a Figura 4.22 apresenta a curva de consumo correspondente à simulação da BR-050 e seu coeficiente de determinação de 0,3449.

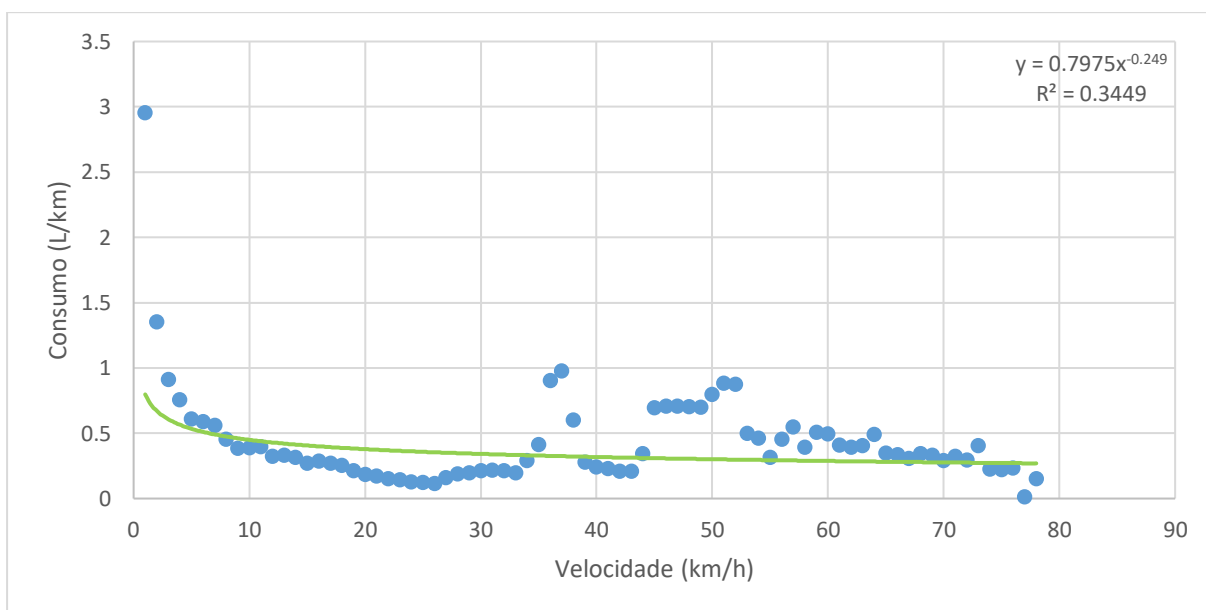


Figura 4.22 - Curva de consumo versus velocidade do VECTO na BR-050

Partindo dessas equações, é possível novamente estimar o consumo de combustível para o ciclo de velocidades real, de forma semelhante ao apresentado no Tópico 4.6. Tais resultados são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Consumo de combustível conforme estimativa usando equações de consumo geradas a partir de resultados das simulações do VECTO e ciclos de velocidades reais

	BR-163	BR-364	BR-050	TOTAL
Distância (km)	649,51	1.229,03	232,91	2.111,45
Consumo (L)	266,16	553,05	68,48	887,69
Consumo (L/100km)	40,98	45,00	29,51	42,04

Com os valores mostrados na Tabela 4.12, estima-se que seriam necessários 887,69 L de diesel para que um caminhão bitrem carregado de soja ou milho se deslocasse de Sorriso até o porto de Santos pelas BR-163, BR-364 e BR-050. Para transportar toda a soja e milho produzidos nesse município com destino à exportação pelo porto de Santos, ou seja, realizando 42.294 viagens, seriam consumidos, portanto, 37.543.960,86 litros de diesel.

Percebe-se, com os valores presentes na Tabela 4.12, que a BR-050, passou a ser a rodovia com menor consumo médio, apresentando uma diferença significativa das outras duas rodovias. Isso porque, como observado na Figura 4.22, grande parte das velocidades apresentam consumo inferior a 0,5 L/km, resultando em uma curva de consumo predominantemente inferior a este valor. Esse acontecimento não é observado nas outras duas curvas, presentes na Figura 4.20 e na Figura 4.21. Os valores da curva abaixo de 0,5 L/km podem ser explicados pela grande quantidade de valores iguais ou próximos do consumo nulo distribuídos pelas diversas velocidades desenvolvidas no ciclo e resultantes da grande quantidade de trechos em declividade, o que faz com que o motor atinja um estágio de baixo consumo pela não necessidade de trabalho adicional ao gerado pela força peso.

Dessa forma, encontra-se que seriam emitidos no total 97.726.930,12 kg de CO₂ nessa cadeia logística, o que equivaleria a uma emissão de 62,79 kg de CO₂ por tonelada de grãos transportada.

4.10 ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE CO₂ POR TONELADA DE SOJA E MILHO CONFORME O MÉTODO *BOTTOM-UP* RECALCULADO

Apesar das autonomies de veículos pesados e do fator de emissão do CO₂ adotados no trabalho conforme indicado nos Itens 4.1 e 4.2, deve-se salientar que o Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (IBTS) realizou uma recalibração dos rendimentos energéticos de caminhões (IBTS, 2019) e que o FE do biodiesel é menor que o do diesel (MMA, 2014).

Considerando-se o FE do diesel igual a 2,603 e o FE do biodiesel igual a 2,431 (MMA,2014), obtém-se que o FE do combustível diesel B12 (88% diesel e 12% biodiesel), é de 2,582 kg de CO₂ por litro de diesel B12.

A Tabela 4.13 apresenta as autonomies de veículos pesados propostas pelo IBTS e os valores de consumo de combustível segundo tais autonomies. A tabela também indica as emissões de CO₂ conforme o FE do combustível diesel B12 e compara essas novas estimativas com a previamente realizada no Item 4.4.

Tabela 4.13 - Distribuição do número de viagens por caminhões da frota circulante e cálculos dos consumos de combustível e das emissões de CO₂

Idade (anos)	Quant. de caminhões por idade	Autonomia (CETESB, 2020b) (km/L)	Litros de diesel consumidos (L)	Emissão de CO ₂ (FE = 2,603) (Kg)	Autonomia (IBTS, 2019) (km/L)	Litros de diesel consumidos recalculado (L)	Emissão de CO ₂ (FE = 2,582) (Kg)
0	546	3,610	308.213,00	802.278,44	2,56	434.628,49	1.122.210,75
1	2.054	3,610	1.158.834,23	3.016.445,49	2,56	1.634.137,33	4.219.342,58
2	1.752	3,610	988.371,56	2.572.731,17	2,56	1.393.758,33	3.598.684,01
3	2.278	3,610	1.285.512,72	3.346.189,60	2,56	1.812.773,79	4.680.581,93
4	2.090	3,610	1.179.474,41	3.070.171,88	2,56	1.663.243,21	4.294.493,96
5	1.720	3,610	970.639,77	2.526.575,32	2,53	1.384.984,02	3.576.028,74
6	1.541	3,610	869.692,83	2.263.810,44	2,50	1.255.836,45	3.242.569,71
7	1.956	3,610	1.103.653,95	2.872.811,24	2,47	1.613.032,70	4.164.850,43
8	2.564	3,610	1.446.635,85	3.765.593,12	2,44	2.140.309,60	5.526.279,38
9	2.796	3,610	1.577.474,80	4.106.166,92	2,41	2.362.939,44	6.101.109,63
10	2.616	3,610	1.475.982,32	3.841.981,97	2,38	2.238.779,90	5.780.529,70
11	2.782	3,448	1.643.381,34	4.277.721,63	2,36	2.401.200,09	6.199.898,62
12	2.396	3,448	1.415.297,86	3.684.020,32	2,33	2.094.565,42	5.408.167,93
13	2.005	3,448	1.184.519,52	3.083.304,32	2,30	1.775.891,34	4.585.351,44
14	2.171	3,448	1.282.535,99	3.338.441,19	2,27	1.948.254,58	5.030.393,33
15	1.693	3,448	999.955,74	2.602.884,79	2,25	1.532.499,22	3.956.912,98
16	1.234	3,448	728.967,11	1.897.501,39	2,22	1.132.288,15	2.923.568,00
17	1.011	3,450	597.034,50	1.554.080,79	2,19	940.533,79	2.428.458,26
18	887	3,450	523.842,88	1.363.563,01	2,17	832.837,76	2.150.387,08
19	729	3,450	430.168,73	1.119.729,21	2,14	693.496,32	1.790.607,50
20	692	3,450	408.868,25	1.064.284,05	2,11	668.528,65	1.726.140,98
21	659	3,450	388.895,38	1.012.294,67	2,09	641.956,48	1.657.531,64
22	554	3,450	327.016,15	851.223,03	2,06	547.672,67	1.414.090,84
23	415	3,450	245.298,93	638.513,11	2,04	414.843,78	1.071.126,63
24	466	3,450	275.000,63	715.826,63	2,01	472.016,00	1.218.745,32
25	529	3,450	312.558,92	813.590,88	1,99	541.873,51	1.399.117,40
26	404	3,450	238.771,35	621.521,82	1,97	418.152,87	1.079.670,70
27	367	3,450	216.786,84	564.296,15	1,97	379.652,08	980.261,68
28	276	3,450	163.076,37	424.487,78	1,97	285.590,59	737.394,91
29	199	3,450	117.783,59	306.590,68	1,97	206.270,75	532.591,08
30	122	3,450	72.176,47	187.875,35	1,97	126.400,42	326.365,87
31	121	3,450	71.484,23	186.073,44	1,97	125.188,11	323.235,71
32	105	3,450	62.252,61	162.043,56	1,97	109.021,08	281.492,42
33	102	3,450	60.332,44	157.045,34	1,94	107.292,22	277.028,52
34	90	3,450	53.153,93	138.359,69	1,92	95.510,98	246.609,34
35	68	3,450	40.221,35	104.696,16	1,90	73.033,50	188.572,49
36	88	3,450	52.140,23	135.721,02	1,87	96.194,54	248.374,31
37	67	3,450	39.822,04	103.656,76	1,85	74.262,72	191.746,34
38	53	3,450	31.486,28	81.958,79	1,83	59.359,38	153.265,92
39	52	3,450	30.595,26	79.639,45	1,81	58.316,93	150.574,30
40	41	3,450	24.138,47	62.832,44	1,78	46.785,24	120.799,49
Total	42.294		24.402.048,80	63.518.533,03		36.833.912,41	95.105.161,85

Dessa forma, se adotados os rendimentos energéticos dos caminhões pesados indicados pelo IBTS, obtém-se um consumo médio de 870,90 litros de diesel por viagem, ou seja, 42,75 L para cada 100 km percorridos. Já com o fator de emissão do diesel B12, encontra-se a razão de 61,11 kg de CO₂ emitidos por tonelada de grãos transportada.

4.11 COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS

Para comparar os resultados obtidos das estimativas realizadas, construiu-se a Tabela 4.14 e a Tabela 4.15.

Tabela 4.14 – Consumos médios de combustível em litros para cada 100 quilômetros percorridos

(L/100km)	<i>Bottom-up</i>	Curva de consumo real	VECTO	Curva de consumo simulada	<i>Bottom-up</i> recalculado
BR-163	-	29,21	41,84	40,98	-
BR-364	-	31,25	46,66	45,00	-
BR-050	-	41,69	43,99	29,51	-
Total	28,32	31,75	44,88	42,04	42,75

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 4.14, concluiu-se que existe boa semelhança entre os resultados das estimativas com base na metodologia *Bottom-up* e na metodologia baseada nas equações de consumo construídas com os valores de consumo reais dos caminhões, tendo a segunda apresentado um valor de consumo médio 12% superior à primeira.

Por outro lado, percebe-se que as duas estimativas construídas com base em resultados advindos da simulação realizada no VECTO mostram-se superiores às com base na metodologia *Bottom-up* e na metodologia das equações de consumo construídas com os valores reais. Porém, apresentam boa concordância com a estimativa denominada *Bottom-up* recalculado, tendo com ela uma diferença de até 5%.

Ao analisar as estimativas obtidas a partir de resultados do VECTO, é possível notar novamente que as curvas de consumo construídas com valores de consumo simulados foram capazes de encontrar taxas de consumo próximas às obtidas pela ferramenta para as BR-163 e BR-364. Isso reforça que a metodologia de estimativa de consumo por meio das curvas de consumo é uma forma simples, mas eficiente de se obter consumos de caminhões. Entretanto, destaque se dá para a BR-050, que apresentou valores bem distintos entre a taxa de consumo do VECTO e a obtida pela curva de consumo simulada, contrapondo-se a esse entendimento.

Já a partir dos valores da Tabela 4.15, percebe-se uma diferença entre as taxas de emissão e CO₂ por tonelada obtidas a partir das estimativas com base na metodologia *Bottom-up* e na metodologia das curvas de consumo com valores de consumo real, isso porque, ainda que a diferença entre as taxas de consumo dessas duas estimativas seja pequena (16,2%), ela é amplificada pela grande distância percorrida entre a origem e o destino, resultando em uma diferença de mais de 10 toneladas de emissão.

Tabela 4.15 - Emissão de CO₂

	<i>Bottom-up</i>	Curva de consumo real	VECTO ¹	Curva de consumo simulada	<i>Bottom-up</i> recalculado ²
(kg/t)	40,81	47,43	67,39	62,79	61,11
Total (t)	63.518,53	73.814,00	104.885,12	97.726,93	95.105,16

Notas: 1) O FE adotado pelo VECTO é de 2,61668 kg/L. 2) O FE adotado no *Bottom-up* recalculado é de 2,582 kg/L. Para as demais estimativas adotou-se FE igual a 2,603 kg/L.

Com relação às emissões advindas dos resultados do VECTO, seus valores são resultado das maiores taxas de consumo de combustível obtidas nessas estimativas, além de, no caso da obtida diretamente do VECTO, um maior fator de emissão adotado pela ferramenta em suas rotinas. Para as emissões segundo a estimativa *Bottom-up* recalculado, por sua vez, tem-se que mesmo tendo sido realizada com um menor FE, apresentou a terceira maior emissão bruta, aproximando-se dos resultados encontrados a partir do VECTO.

As diferenças observadas podem ser explicadas pela falta de informação de emissões de motores disponíveis no mercado brasileiro, isso porque, conforme Roso e Martins (2016), essa realidade leva a possível existência de discrepâncias entre os dados de entrada utilizados no VECTO e os valores reais do motor utilizado.

Além disso, como advertido por Dong *et al.* (2020), modelos de quantificação de emissões precisam ser modificados para levar em conta parâmetros característicos dos veículos estudados e do local de estudo, tais como “as condições da estrada (tipo de pavimento e condição de nivelamento do pavimento), as características do veículo (desempenho do veículo, tipo de motor, velocidade, área frontal, carga, tipo de pneu, tipo de combustível) e o clima da região”. Entretanto, nem todos os fatores citados puderam ser incluídos no VECTO, como foi o caso das características do pavimento, parâmetros do motor e do combustível, e condições do clima.

4.12 PRECIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂

Como apresentado por Alayza *et al.* (2022), embora houvesse a expectativa de que os detalhes operacionais do mercado de carbono fossem acertados durante a COP 27 realizada no Egito em 2022, as partes decidiram dar continuidade nas negociações por mais dois anos.

Conforme ferramenta da Fundação Getúlio Vargas (FGV), o preço médio do crédito de carbono na América Latina e Caribe entre os anos de 2016 e 2020 foi de 3,22 dólares, ou aproximadamente 16,60 reais considerando o preço médio do dólar em 2020 igual a 5,1558 reais. Isso quer dizer que a emissão de uma tonelada de dióxido de carbono equivale a um valor financeiro de 16,60 reais (FGV, 2022; IPEA, 2022).

Dessa forma, o transporte da soja e do milho produzidos em Sorriso-MT com destino à exportação pelo porto de Santos-SP e transportado inteiramente por modo rodoviário, custou em 2020, em termos de créditos de carbono, o equivalente a entre 1,05 e 1,74 milhão de reais. Com relação ao consumo de combustível, esse transporte custou entre 85,85 e 141,01 milhões de reais, considerando um valor médio de 3,518 reais por litro de diesel (CNT, 2020). Ou seja, o valor das emissões de gases representou em torno de 1,23% dos custos de combustível.

Esses valores demonstram que a política de crédito de carbono ainda possui pequeno poder de incentivo à diminuição das emissões no setor de transporte de grãos no Brasil. Por isso, é preciso que o mercado de carbono seja regulamentado e calibrado para a realidade brasileira, de modo a incluir todos os setores da economia, em especial aqueles que mais poluem como o de transportes. Somente a partir disso, o mercado de carbono poderá induzir a redução da emissão de gases por meio de estratégias como a hibridização de frotas de caminhões e a construção de uma matriz de transporte mais equilibrada entre os modos de transporte.

4.13 PROPOSIÇÃO DA CURVA DE CONSUMO UNIVERSAL

Percebe-se que o método de estimativa a partir das curvas de consumo possui boa correlação com o método *Bottom-up*. Porém, existe uma variação entre as curvas características de veículo para veículo, sendo necessário construir tal curva a partir de dados levantados durante a operação do caminhão o que nem sempre é possível.

Diante dessa dificuldade e objetivando permitir a aplicação dessa metodologia em caminhões pesados operantes na frota brasileira, procedeu-se a construção e proposição de uma curva de consumo universal para caminhões pesados. Para isso, calculou-se a média dos valores de consumo para cada velocidade dos três veículos aqui apresentados e das simulações dos três trechos realizadas no VECTO e a partir de então montou-se uma curva média entre as seis curvas (três reais e três simuladas). A curva encontrada é apresentada na Figura 4.23 e a equação que a descreve é a Equação (4.7), que apresentou um coeficiente de determinação de 0,7404.

$$FC = 2,5634 * v^{-0,493} \quad (4.7)$$

Onde:

- FC = Consumo de combustível (L/km);
- v = Velocidade (km/h).

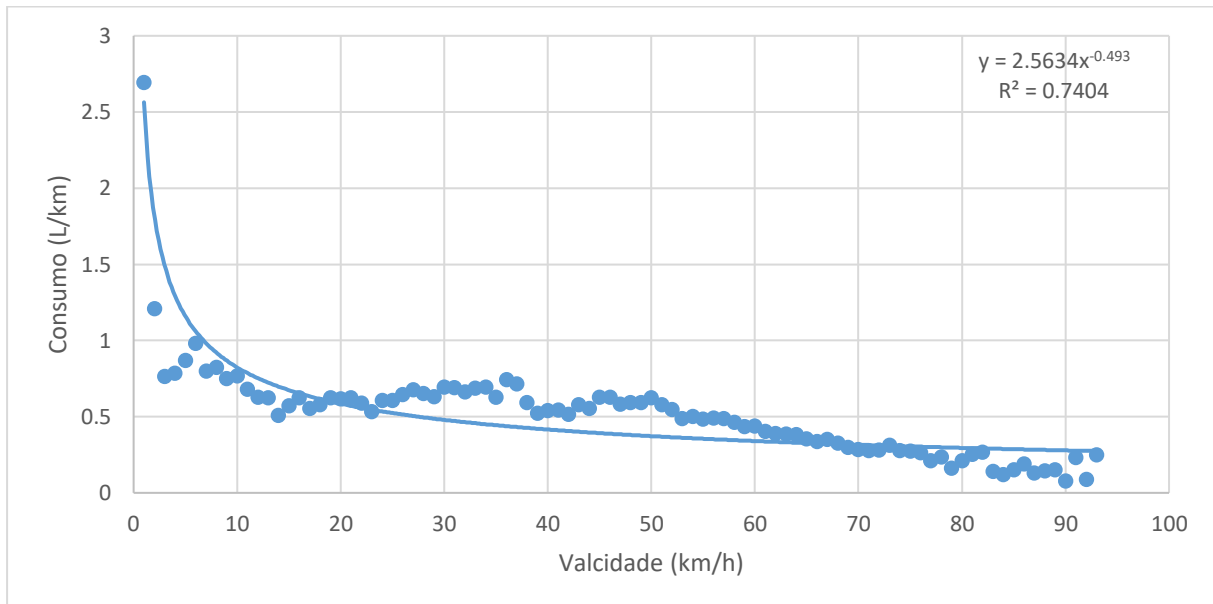


Figura 4.23 - Curva universal de consumo versus velocidade proposta para caminhões pesados

Ao comparar a curva geral apresentada na Figura 4.23 com as demais curvas reais, percebe-se uma boa correlação entre elas, tendo a curva universal apresentado valores de consumo por velocidade muito próximos aos das curvas das BR-163 e BR-364 e inferiores aos da BR-050 como pode ser observado na Figura 4.24. Isso pode ser notado também ao aplicar a curva universal aos ciclos de velocidades dos trechos como disposto na Tabela 4.16.

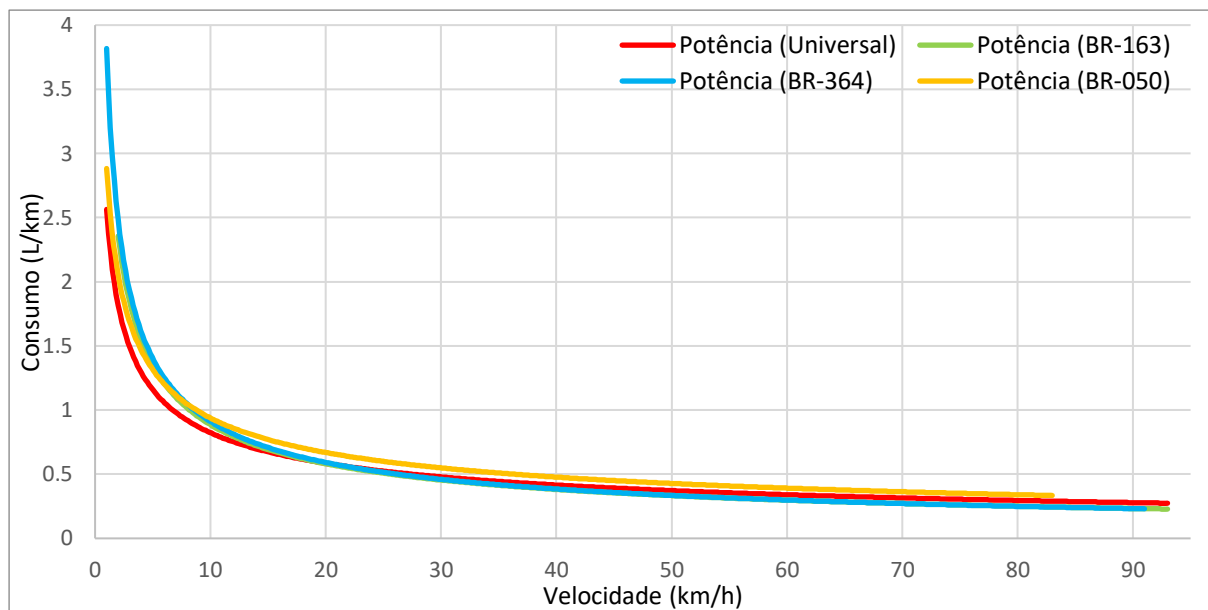


Figura 4.24 - Comparação entre as curvas de consumo universal e reais

Tabela 4.16 - Comparação entre consumos encontrados a partir das curvas reais e universal

	BR-163	BR-364	BR-050
Curva real (L/100km)	29,21	31,25	41,69
Curva universal (L/100km)	33,44	35,10	36,21
Diferença percentual	14,45%	12,33%	-13,13%

Tendo como base a Equação (4.7) e a junção dos ciclos de velocidades dos três veículos estudados, obtém-se que o consumo médio para um caminhão percorrer todo o percurso analisado é de 34,72 L/100km, apresentando, portanto, uma diferença de 22,60% em relação ao consumo obtido a partir da metodologia *Bottom-up* no Tópico 4.4.

A partir desse consumo, encontra-se que são consumidos 732,54 litros de diesel e, portanto, 1.906,80 kg de CO₂ por viagem, o que corresponde a um total de 80.646.199,20 toneladas de CO₂ emitidas durante as 42.294 viagens para o transporte de toda a soja e milho produzidos em Sorriso-MT rumo ao porto de Santos-SP por meio das rodovias estudadas, ou seja, 51,82 kg de CO₂ por tonelada transportada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A correta estimativa de emissão de gases do efeito estufa por todos os setores é essencial para a computação total de emissões do país e conseqüentemente para o estabelecimento de políticas que permitam o alcance dos compromissos firmados pelo Brasil em âmbito internacional, como no Acordo de Paris.

Além disso, o setor de transportes é um dos maiores emissores de GEE em âmbito mundial e no Brasil, com destaque para o modo rodoviário por sua maior taxa de emissão e maior participação na matriz de transportes nacional. Entretanto, ainda existem lacunas no conhecimento científico acerca das emissões desse setor, em especial no de transporte de cargas.

Por isso, é de interesse acadêmico encontrar formas simples e ao mesmo tempo precisas de estimar as emissões provenientes de veículos de carga pesados que compõem a frota brasileira. Dessa forma, neste estudo propôs-se uma metodologia de estimativa de consumo de combustível para caminhões movidos a diesel a partir da curva geral de consumo desse grupo de veículos construída por meio de dados provenientes de três caminhões analisados neste trabalho e do ciclo de velocidades desenvolvido pelo caminhão na rota de interesse.

O estudo estimou o consumo de combustível e, em conjunto com o Fator de Emissão adotado, a emissão de CO₂ para o transporte de soja e milho produzidos no município de Sorriso-MT com destino ao porto de Santos-SP por rota inteiramente rodoviária. Nesse sentido, obteve-se que são necessárias 42.294 viagens realizadas por caminhões do tipo bitrem carregados para transportar toda soja e milho produzidos em Sorriso-MT e destinados à exportação pelo porto de Santos-SP e que, portanto, essa cadeia logística emite entre 63,52 e 104,89 mil toneladas de CO₂.

Também foi possível observar, a partir das análises desenvolvidas, que trechos que permitem um desenvolvimento de maiores velocidades, superiores a 70 km/h na BR-163, possuem um consumo médio inferior àqueles que apresentam um histograma de velocidades com maior presença de velocidades inferiores a 40 km/h (BR-050). Outro fator que se mostrou importante na quantificação do consumo de combustível a partir da ferramenta VECTO foi o perfil de inclinações do trecho, tendo a rodovia sem grandes elevações aliada às maiores velocidades apresentado o menor consumo (BR-163) e a com maior presença de declives mais elevados, porém com baixas velocidades, o segundo maior consumo (BR-050).

Quanto a relação consumo/velocidade, faz-se importante destacar que as baixas velocidades que elevam o consumo médio dos veículos podem ser fruto de uma menor condição de conservação do pavimento do trecho.

Procedeu-se ainda a precificação das emissões encontradas por meio do mercado de crédito de carbono, de onde obteve-se que o valor das emissões provenientes da cadeia logística estudada corresponde a apenas 1,23% do gasto com combustível. Isso implica em um baixo incentivo por parte do custo da produção de carbono para a adoção de meios que diminuam as taxas de

emissão encontradas.

A Tabela 5.1 apresenta os principais resultados calculados neste trabalho, bem como permite a realização de um comparativo entre eles.

Tabela 5.1 - Principais resultados calculados no trabalho

Descrição	Quantidade
Quantidade de soja e milho transportada (2020)	1.556.390 t
Distância média percorrida na rota	2.037 km
Número de viagens necessárias	42.294 viagens
Consumo de diesel por viagem – <i>Bottom-up</i>	576,96 L
Consumo de diesel por viagem – VECTO	947,68 L
Consumo de diesel por viagem – Equações reais	670,48 L
Consumo de diesel por viagem – Equação geral	732,54 L
Consumo de diesel por viagem – <i>Bottom-up</i> recalculado	870,90 L
Kg de CO ₂ por tonelada de grãos – <i>Bottom-up</i>	40,81 Kg _{co2} /t _{grãos}
Kg de CO ₂ por tonelada de grãos – VECTO	67,39 Kg _{co2} /t _{grãos}
Kg de CO ₂ por tonelada de grãos – Equações reais	47,43 Kg _{co2} /t _{grãos}
Kg de CO ₂ por tonelada de grãos – Equação geral	51,82 Kg _{co2} /t _{grãos}
Kg de CO ₂ por tonelada de grãos – <i>Bottom-up</i> recalculado	61,11 Kg _{co2} /t _{grãos}

5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho apresentou algumas limitações que são apresentadas a seguir:

- Não foi possível obter informações como motorização e ano de fabricação dos três caminhões utilizados neste estudo. Também não foi informado a massa da carga transportada por estes três veículos;
- Os dados fornecidos não apresentavam a informação do hodômetro do caminhão, impedindo assim o cálculo direto da distância percorrida entre dois pontos consecutivos;

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se que sejam executadas estimativas de consumo e de emissões de GEE com base na curva universal de consumo de caminhões pesados proposta neste trabalho em outras cadeias logísticas de transporte rodoviário de cargas no Brasil. Dessa forma, é possível fazer comparações a nível nacional e identificar e propor projetos adequados a realidade brasileira que possam diminuir a emissão de gases.

Além disso, incentiva-se que sejam realizados mais estudos na área de transporte de grãos, tendo em vista a sua importância para a economia nacional, em especial a respeito da emissão de poluentes resultante desta movimentação a fim de se precisar os efeitos do uso mais racional dos modos de transporte por meio de, por exemplo, cadeias intermodais de transporte.

Por fim, uma proposta a ser analisada e ainda pouco discutida é a adoção de veículos híbridos e elétricos para o transporte de carga de longas distâncias. Para isso, faz-se importante estudar

não só o desempenho destes veículos em operação, mas todo o processo logístico que os sustenta, como ciclo de vida de baterias e produção e distribuição de eletricidade, bem como a infraestrutura necessária para sua aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGROSTAT (2020) *Agrostat. Estatística de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/pages/AGROSTAT.html> Acesso em: 13 fev. 2023.
- ALAYZA, N., BHANDARI, P., BURNS, D., COGSWELL, N., ZOYSA, K., FINCH, M., FRANSEN, T., GONZALEZ, M. L., KRISHNAN, N., LANGER, P., LARSEN, G., SROUJI, J., WARSZAWSKI, N. & WASKOW, D. (2022) *COP27: principais resultados e perspectivas para 2023*. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/cop27-principais-resultados-e-perspectivas-para-2023#:~:text=A%20COP27%2C%20realizada%20em%20Sharm,danos%20decorrentes%20das%20mudanças%20climáticas> Acesso em: 08 fev. 2023.
- ALMEIDA, P. R. V., ZINATO, G. R. & WANDER, A. E. (2011) Análise da logística de transporte na comercialização da produção de soja na região Centro-Oeste com foco no modal rodoviário. *Anais do 49º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural*, SOBER, Belo Horizonte, p. 1–18. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/39379/1/71.pdf> Acesso em: 01 fev. 2023.
- ALMEIDA, C. A., SELEME, R. & CARDOSO NETO, J. (2013) Rodovia transoceânica: Uma alternativa logística para o escoamento das exportações da soja brasileira com destino à China. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 51, p. 351–368. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-20032013000200008>
- ANFAVEA (2022) Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira*. São Paulo, 132 p. Disponível em: <https://acervo.anfavea.com.br/AcervoDocs/Anuário%20ANFAVEA%202022-422-0.pdf> Acesso em: 01 fev. 2023.
- ANP (2021a) Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Fatores de Conversão, Densidades e Poderes Caloríficos Inferiores*. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2022/outras-pecas-documentais/fatores-conversao-2022.pdf> Acesso em: 13 fev. 2023.
- ANP (2021b) Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Cartilha do Posto Revendedor de Combustíveis*. 6. ed. Rio de Janeiro. 22 p. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/cartilhas-e-guias/arq/cartilhapostorevendedor6ed.pdf> Acesso em: 13 fev. 2023.
- ANTAQ (2020) Agência Nacional de Transportes Aquaviários. *Anuário estatístico da ANTAQ*. Disponível em: <http://anuario.antaq.gov.br> Acesso em: 13 fev. 2023.
- ANTT (2022) Agência Nacional de Transportes Terrestres. *Volume de Tráfego Equivalentes nas Praças de Pedágio*. Disponível em: <https://dados.antt.gov.br/dataset/volume-trafego-equivalente-praca-pedagio> Acesso em: 13 fev. 2023.
- BIAGGIONI, M. A. M. & BOVOLenta, F. C. (2010) Balanço energético comparativo para rotas de escoamento de soja. *Engenharia Agrícola*, v. 30, p. 587-599. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000400003>

- BRANCO, J. E. H., BARTHOLOMEU, D. B., ALVES JUNIOR, P. N. & CAIXETA FILHO, J. V. (2022) Evaluation of the economic and environmental impacts from the addition of new railways to the Brazilian's transportation network: an application of a network equilibrium model. *Transport Policy*, v. 124, p. 61-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.03.011>
- BRASIL (2016) *Intended Nationally Determined Contribution (NDC)*. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf> Acesso em: 13 fev. 2023.
- BRASIL (2020). *Brazil's Nationally Determined Contribution (NDC)*. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Brazil%20First%20NDC%20%28Updated%20submission%29.pdf> Acesso em: 13 fev. 2023.
- BRASIL (2022) *Nationally Determined Contribution (NDC)*. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20FINAL%20-%20PDF.pdf> Acesso em: 13 fev. 2023.
- CACHOLA, C. S., ANDRADE, A. C. C. & PEYERL, D. (2022) Tendências e Perspectivas para o Consumo de Combustíveis no Transporte Rodoviário Brasileiro entre 2020 e 2030. *Anais do III Simpósio Interdisciplinar de Ciência Ambiental*, p. 167-176. doi: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.16766578>
- CAMPOS, A. C. (2021) *Produção agrícola em 2020 bate novo recorde e atinge R\$ 470,5 bilhões, Produto que mais contribuiu para o resultado foi a soja*. Agência Brasil, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-09/producao-agricola-em-2020-bate-novo-recorde-e-atinge-r-4705-bilhoes#:~:text=O%20valor%20da%20produção%20agrícola,mais%20do%20que%20em%202019> Acesso em: 02 fev. 2023.
- CANEPPELE, C., SILVA, A. R. B., PEREIRA, P. S. X., BLANGER, B. R., DAROS, R., SANTOS, L. O., CAÑIZARES, L. C. & CAMPOS, L. O. (2021) *Perdas no transporte rodoviário de grãos*. Perdas em transporte e armazenagem de grãos: panorama atual e perspectivas, P. C. Machado Junior & S. A. Reis Neto (eds.), Conab, Brasília, pp. 148-156. Disponível em: http://faculdafastech.com.br/fotos_upload/2022-02-09_14-50-42.pdf#page=148 Acesso em: 01 fev. 2023.
- CEPEA (2022) Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. *PIB do Agronegócio. PIB do Agronegócio Cresceu Abaixo das Projeções*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Brasil, 19 p. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_CNA_PIB_JAn_Dez_2021_Março2022.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- CETESB (2020a) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Ficha de Informação Toxicológica (FIT): Diesel*. São Paulo, 2 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/07/Diesel.pdf> Acesso em: 13 fev. 2023.
- CETESB (2020b) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Relatórios e Publicações: Relatórios de Emissões Veiculares no Estado São Paulo*, Dados: Fator de emissão. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/> Acesso em: 13 fev. 2023.

- CETESB (2022a) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Emissões veiculares no estado de São Paulo: 2020*. Relatório, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, São Paulo, 222 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2022/03/Relatorio-Emissoes-Veiculares-2020.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2023.
- CETESB (2022b) Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Emissões Veiculares no Estado de São Paulo: 2021*. Relatório, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, São Paulo, 226 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2023/01/Relatorio-Emissoes-2021-completo.pdf> Acesso em: 13 fev. 2023.
- CNA (2021) Confederação da Agricultura e Pecuária. *Panorama do Agro. A CNA defende, trabalha e fala em seu nome e de todos os produtores rurais do Brasil*, Brasil. Disponível em: <https://cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro> Acesso em: 02 fev. 2023.
- CNT (2015) Confederação Nacional do Transporte. *Entraves Logísticos ao escoamento de Soja e Milho*. Relatório, Brasília, 158 p. Disponível em: <http://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/185> Acesso em: 02 fev. 2023.
- CNT (2020) Confederação Nacional do Transporte. *Preço do diesel começou 2020 em queda, mas termina ano com tendência de elevação. Economia em Foco, da CNT, analisa comportamento do preço do principal insumo do transporte rodoviário no Brasil; preço médio registrou alta de 17,0% no acumulado de maio a novembro*, Brasília. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/diesel-comecou-2020-queda-termina-ano-elevacao> Acesso em: 02 fev. 2023.
- COMEX STAT (2020) Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home> Acesso em: 13 fev. 2023.
- CONAMA (1995) Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA 15/1995, de 13 de Dezembro de 1995*. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~phoenics/EM974/PROJETOS/PROJETOS%201%20SEM-10/TURMA%20A/G2/Materiais%20novos%20974/legisla%E7%E3o.pdf> Acesso em 13 fev. 2023.
- CONAMA (2018) Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução Conama Nº 490, de 16 de Novembro de 2018*. Brasília. 13 p. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=767 Acesso em: 13 fev. 2023.
- CONTRAN (2021) Conselho Nacional de Trânsito. *Resolução Contran Nº 882*. Diário Oficial da União: edição 242, seção 1, p. 153. Brasília. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-contran-n-882-de-13-de-dezembro-de-2021-370017699> Acesso em: 13 fev. 2023.
- CORREA, V. H. C. & RAMOS, P. (2010) A precariedade do transporte rodoviário Brasileiro para o escoamento da produção de soja do Centro-Oeste: situação e perspectivas. *Revista de*

Economia e Sociologia Rural, v. 48, p. 447–472. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-20032010000200009>

- CUNHA, A. L. B. N., MON-MA, M. L., ARAÚJO, J. J., EGAMI, C. Y. & SETTI, J. R. (2005) Caracterização da frota de caminhões no sistema Anhanguera-Bandeirantes. *Anais do XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Recife. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Andre-Cunha-11/publication/264383436_Caracterizacao_da_frota_de_caminhoes_no_sistema_Anhanguera-Bandeirantes/links/53daae360cf2e38c63397673/Caracterizacao-da-frota-de-caminhoes-no-sistema-Anhanguera-Bandeirantes.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- DEBONE, D., LEIRIÃO, L. F. L. & MIRAGLIA, S. G. E. K. (2020) Air quality and health impact assessment of a truckers' strike in Sao Paulo state, Brazil: a case study. *Urban Climate*, v. 34, p. 1-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100687>
- DEMETINO, A. G. & MACENO, M. M. C. (2017) Análise do ciclo de vida do transporte da soja considerando perdas no processo. *Revista Técnico-Científico do CREA-PR*, p. 1–21. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/264/145> Acesso em: 02 fev. 2023.
- DIONISIO, E. A., FREITAS, W. J. & IGNÁCIO, P. S. A. (2015) Prospecção de cenários para uma cadeia agroexportadora de soja. *Revista Espacios*, v. 36, p. 16. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a15v36n22/15362216.html> Acesso em: 02 fev. 2023.
- DNIT (2017) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT). Pesquisa Origem-Destino*. Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/PesquisaOD/Carga> Acesso em: 13 fev. 2023.
- DNIT (2021) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT). Estimativa do volume médio diário anual: dados de estimativa VM Da versão 2020*. Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Modelagem>. Acesso em: 23 dez. 2021.
- DONG, Y., XU, J. & GU, C. (2020) Modelling carbon emissions of diesel trucks on longitudinal slope sections in China. *Plos One*, v. 15, n. 6, p. 1-17. doi: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0234789>
- EMBRAPA (2022) Embrapa Soja, *Soja em números (safra 2021/22)*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos> Acesso em: 02 fev. 2023.
- EPE (2021) Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2021, Relatório Síntese, ano base 2020*. Relatório. Rio de Janeiro, 73p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_Síntese_2021_PT.pdf Acesso em: 13 fev. 2023.
- EPL (2020) Empresa de Planejamento e Logística. *Anuário Estatístico de Transportes 2010 - 2020*. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/AnuarioEstatisticodeTransportes2020QRcode21.06.2020.pdf> Acesso em: 12 jun. 2021.

- FENABRAVE (2021) Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. *Anuário FENABRAVE 2021*, O desempenho da Distribuição Automotiva no Brasil. Disponível em: https://www.fenabreve.org.br/anuarios/2003_12_2.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- FGV (2022) Fundação Getúlio Vargas. *Dashboard: precificação de Carbono*. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNTZkNjc0NTAtYTVjMi00OTc1LWJhZTEtYWQxY2M0YzdjMGM0IiwidCI6ImRINGNIMThjLTUyMTQtNDA2OS04MTg4LTFiOGZiNDJIM2NjZSJ9&pageName=ReportSection8563bbab36110c9ec008> . Acesso em: 02 fev. 2023.
- GÂNDARA, G. & CRUZ, P. B. (2019) A satisfação no trabalho como antecedente da produtividade no transporte rodoviário de cargas. *Revista Fatec Zona Sul*, v. 5, p. 38-49. Disponível em: <https://www.revistarefas.com.br/RevFATECZS/article/view/311/217> Acesso em: 02 fev. 2023.
- GONÇALVES, C. A. B. (2016) *O mercado de caminhões no Brasil: um estudo econométrico dos determinantes das vendas de veículos*. Dissertação de Mestrado, Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getulio Vargas, São Paulo, 124 p. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/17541/carlos%20goncalves%20-%20Dissertação%20-%20%20o%20mercado%20de%20caminhões%20no%20brasil%20-02122016.pdf?sequence=3&isAllowed=y> Acesso em: 02 fev. 2023.
- HIRAKURI, M. H. & LAZZAROTTO, J. J. (2014) O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro. Embrapa, Londrina, 37 p. Disponível em : <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/990000/1/Oagronegociodasojanoscontextosmundialebrasileiro.pdf> Acesso em: 02 fev. 2023.
- IBGE (2017) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Agro, 2017*. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/agricultura.html Acesso em: 13 fev. 2023.
- IBTS (2019) Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável. *Transportes no Brasil: Panorama e Cenários Prospectivos para Atendimento da Contribuição Nacionalmente Determinada*. Rio de Janeiro. 56 p. Disponível em: https://ibts.eco.br/src/uploads/2019/12/transportes-no-brasil_relatorio-de-referencia.pdf Acesso em: 05 mai. 2023.
- ICCT (2019) The International Concil on Clean Transportation. *Adapting the Vehicle Energy Consumption Calculation Tool (VECTO) for Use in India and Other Countries*. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_VECTO-India_20190926.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- IPEA (2022) Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. *Taxa de Câmbio - R\$ / US\$ - Comercial - Venda - Média*. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=31924>. Acesso em: 02 fev. 2023.
- IPCC (2006) Intergovernmental Panel on Climate Change. *MOBILE COMBUSTION*, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. pp. 1-78. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf. Acesso em: 02 fev. 2023.

- LAJEVARDI, S. M., AXSEN, J. & CRAWFORD, C. (2018) Examining the role of natural gas and advanced vehicle technologies in mitigating CO2 emissions of heavy-duty trucks: modeling prototypical british columbia routes with road grades. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 62, p. 186-211. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.011>
- LIMA, C. M., FLEURY, L. V., SILVA, F. A., BESSA JUNIOR, J. E., COSTA, L. A., VELHO, D. M. C. & ANDALÍCIO, A. F. (2018) Caracterização da frota de caminhões da rodovia BR-040 para fins de simulação microscópica com o VISSIM. *Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte*, ANPET, Gramado, p. 3223–3230. Disponível em: http://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Trafego%20Urbano%20e%20Rodoviario/CT/7_727_CT.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- LOPES, H. S. & LIMA, R. S. (2017) Alternatives for the soybean exportation in Brazil: A cost based analysis for transport via the Tocantins-Araguaia waterway. *Custos e Agronegócio*, v. 13, p. 239–261. Disponível em: <http://www.custoseagronegocioonline.com.br/numero1v13/OK%2010%20soybean.pdf> Acesso em: 02 fev. 2023.
- MACHADO, P. G., TEIXEIRA, A. C. R., COLLAÇO, F. M. A., HAWKES & A., MOUETTE, D. (2020) Assessment of Greenhouse Gases and Pollutant Emissions in the Road Freight Transport Sector: a case study for são paulo state, brazil. *Energies*, v. 13, n. 20, p. 1-26. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/en13205433>
- MARTINOVIC, L. V. P. (2015) *Avaliação Econômica Da Frota Brasileira De Caminhões De Transportadores Remunerados*. Monografia de Graduação, Departamento De Engenharia De Produção, Universidade De Brasília, Brasília, 46 p. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/12668/1/2015_LeticiaDoVallePiresMartinovic.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- MASCARENHAS, C. S., OLIVEIRA, A. L. R., LOPES, B. F. R. & COLETI, J. C. (2014) Avaliação da rede de armazenagem para a soja do Estado do Mato Grosso: Aplicação de um modelo de localização. *Revista Espacios*, v. 35, p. 23. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a14v35n11/14351123.html> Acesso em: 02 fev. 2023.
- MMA (2014) Ministério do Meio Ambiente. *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários - 2013, Ano-Base 2012*. Relatório Final. Brasil. 115 p. Disponível em: <https://iema-site-staging.s3.amazonaws.com/2014-05-27inventario2013.pdf> Acesso em: 02 fev. 2023.
- MTPA (2017) Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. *Relatório 2017. Corredores Logísticos Estratégicos: volume I - complexo de soja e milho*. Relatório. Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/relatorio_corredores_logisticos_sojamilho_v1-2.pdf Acesso em: 13 fev. 2023.
- NIMESH, V., KUMARI, R., SONI, N., GOSWAMI, A. K. & REDDY, V. M. (2021) Implication viability assessment of electric vehicles for different regions: an approach of life cycle assessment considering exergy analysis and battery degradation. *Energy Conversion and Management*, v. 237, p. 1-16. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114104>

- ONU (2015) Organização das Nações Unidas. *Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Disponível em: https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf. Acesso em: 08 fev. 2023.
- PÉRA, T. G., CAIXETA FILHO, J. V. & SALIN, D. L. (2021) *Brazil Modal Share Analysis for Corn and Soybeans: 2010-19*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Brasil, 36 p. Disponível em: https://esalqlog.esalq.usp.br/Brazil_modalshare_USDA-ESALQ2020.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- PETROBRAS (2021) Petróleo Brasileiro S.A. *Óleo Diesel: Informações Técnicas*. Disponível em: https://petrobras.com.br/data/files/04/93/72/4C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual-de-Diesel_2021.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- PONTE JÚNIOR, L. C. & ROTTA, I. S. (2019) Aspectos ergonômicos: impacto da agroindústria no aumento da demanda dos caminhões. *Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, ConBRepro, Ponta Grossa. Disponível em: https://aprepro.org.br/combrepro/2019/anais/arquivos/10202019_201006_5daceab6c6479.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- POTENZA, R. F., QUINTANA, G. O., CARDOSO, A. M., TSAI, D. S., CREMER, M. S., SILVA, F. B., CARVALHO, K., COLUNA, I., SHIMBO, J., SILVA, C., SOUZA, E., ZIMBRES, B., ALENCAR, A., ANGELO, C. & AZEVEDO, T. (2021) *Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020*. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), Brasil, 55 p. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2021/10/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- RIBEIRO, S. K., REAL, M. V. & D'AGOSTO, M. A. (2003) Transport and carbon dioxide emission: the Brazilian case. *Urban Transport And The Environment In The 21 St Century*, Rio de Janeiro, v. 64, p. 333-342, Disponível em: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/UT03/UT03034FU.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2023.
- Ricardo-AEA. (2014) *Production of Updated Emission Curves for Use in the National Transport Model*. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/662795/updated-emission-curves-ntm.pdf. Acesso em: 08 fev. 2023.
- ROMEIRO, V., GENIN, C. & FELIN, B. (2021) *Nova NDC do Brasil: entenda por que a meta climática foi considerada pouco ambiciosa*. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/nova-ndc-do-brasil-entenda-por-que-meta-climatica-foi-considerada-pouco-ambiciosa#:~:text=Na%20prática%2C%20a%20nova%20NDC,meta%20se%20torna%20menos%20ambiciosa>. Acesso em: 08 fev. 2023.
- ROSO, V. R. & MARTINS, M. E. S. (2016) Simulation of Fuel Consumption and Emissions for Passenger Cars and Urban Buses in Real-World Driving Cycles. *Sae Technical Paper Series*, p. 1-8,. doi: <http://dx.doi.org/10.4271/2016-36-0443>

- SEEG (2022) Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. *Emissões por setor: energia*. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/energia>. Acesso em: 02 fev. 2023.
- SENATRAN (2022) Secretaria Nacional de Trânsito. *Frota de Veículos: 2022*. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2022> Acesso em: 13 fev. 2023.
- SIDRA (2021) Sistema IBGE de Recuperação Automática. *Produção Agrícola Municipal (PAM)*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas> Acesso em: 13 fev. 2023.
- SILVA, A. C. A. C. & PIZZOLATO, N. D. (2022) Utilização de veículos elétricos no transporte de carga e os desafios para implementação no Brasil. *Ambiente & Sociedade*, v. 25, p. 1-22. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210128r1vu202213ao>
- SILVA, M. P. & MARUJO, L. G. (2012) Análise de modelo intermodal para escoamento da produção da soja no centro oeste brasileiro. *Journal of Transport Literature*, v. 6, p. 90–106. doi: [10.1590/s2238-10312012000300006](https://doi.org/10.1590/s2238-10312012000300006)
- SIMS R., SCHAEFFER R., CREUTZIG F., CRUZ-NÚÑEZ X., D'AGOSTO M., DIMITRIU D., FIGUEROA MEZA M. J., FULTON L., KOBAYASHI S., LAH O., MCKINNON A., NEWMAN P., OUYANG M., SCHAUER J. J., SPERLING D. & TIWARI G. (2014) *Transport, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter8.pdf Acesso em: 08 fev. 2023.
- SINDIPEÇAS (2022) Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores. *Relatório da Frota Circulante de 2022*. 14 p. Disponível em: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2022/RelatorioFrotaCirculante_2022.pdf Acesso em: 02 fev. 2023.
- SONG, Y., YAO, E., ZUO, T. & LANG, Z. (2013) Emissions and Fuel Consumption Modeling for Evaluating Environmental Effectiveness of ITS Strategies. *Discrete Dynamics In Nature And Society*, v. 2013, p. 1-9. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/581945>
- SOUZA, M. C. O. & CORAZZA, R. I. (2017) Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 42, p. 42-80. doi: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v42i0.51298>
- TELLES, T. S., GUIMARÃES, M. F. & ROESSING, A. C. (2009) A infra-estrutura de transporte frente à expansão da cultura da soja no Brasil. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 30, p. 1109-1122, 2009. doi: [10.5433/1679-0359.2009v30n4sup1p1109](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2009v30n4sup1p1109)
- TORRES, O.; FAGUNDES, M. B. B.; FIGUEIREDO, A. M. R. & TREDEZINI, C. A. O. (2017) Impacto da implantação do custo do pedágio na BR-163 em relação ao transporte de soja do estado de Mato Grosso. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 55, p. 533–550. doi: <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550307>

- VANZELLA, A., MENEZES, T. M., AJALA, M. D. L., CHAVES, C. J. A. & KAVESKI, M. S. (2015) Análise de Viabilidade Econômica para Transportar a Soja Produzida em Sorriso-MT: Os Corredores de Escoamento Noroeste e Paraná-Tietê. *Anais do 4º Encontro Científico de Administração, Economia e Contabilidade*, ECAEC, Brasil, v. 1, p. 1–14. Disponível em: <https://anaisonline.uems.br/index.php/ecaeco/article/view/2572/2745> Acesso em: 02 fev. 2023.
- ZACHAROF, N., FONTARAS, G., GRIGORATOS, T., CIUFFO, B., SAVVIDIS, D., DELGADO, O. & RODRIGUEZ, J. F. (2017) Estimating the CO2 Emissions Reduction Potential of Various Technologies in European Trucks Using VECTO Simulator. *SAE Technical Paper*, p. 1-19. doi: <https://doi.org/10.4271/2017-24-0018>
- ZACHAROF, N., TANSINI, A., PRADO, I., GRIGORATOS, T. & FONTARAS, G. (2019a) A Generalized Component Efficiency and Input-Data Generation Model for Creating Fleet-Representative Vehicle Simulation Cases in VECTO. *SAE Technical Paper*, p. 1-13. doi: <https://doi.org/10.4271/2019-01-1280>
- ZACHAROF, N., ÖZENER, O., ÖZKAN, M., KILICASLAN, A. & FONTARAS, G. (2019b) Simulating City-Bus On-Road Operation With VECTO. *Frontiers in Mechanical Engineering*, v. 5, p. 1-13. doi: <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00058>