



DESAGREGAÇÃO ESPACIAL DE INVENTÁRIOS DE ENERGIA E EMISSÕES
ATMOSFÉRICAS DO SETOR DE TRANSPORTES COM VISTA À
MENSURAÇÃO, RELATO E VERIFICAÇÃO

George Vasconcelos Goes

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Rio de Janeiro

Março de 2023

DESAGREGAÇÃO ESPACIAL DE INVENTÁRIOS DE ENERGIA E EMISSÕES
ATMOSFÉRICAS DO SETOR DE TRANSPORTES COM VISTA À
MENSURAÇÃO, RELATO E VERIFICAÇÃO

George Vasconcelos Goes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Aprovada por: Márcio de Almeida D'Agosto

Suzana Kahn Ribeiro

Carolina Burle Schmidt Dubeux

Rafael Garcia Barbastefano

Luciana Maria Baptista Ventura

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2023

Goes, George Vasconcelos

Desagregação espacial de inventários de energia e emissões atmosféricas do setor de transportes com vista à mensuração, relato e verificação/ George Vasconcelos Goes – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XII, 139 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Márcio de Almeida D’Agosto

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 121-134.

1. Inventários. 2. Energia. 3. Emissões. 4. MRV. 5. Alocação. I. D’Agosto, Márcio de Almeida, II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DESAGREGAÇÃO ESPACIAL DE INVENTÁRIOS DE ENERGIA E EMISSÕES
ATMOSFÉRICAS DO SETOR DE TRANSPORTES COM VISTA À
MENSURAÇÃO, RELATO E VERIFICAÇÃO

George Vasconcelos Goes

Março/2023

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Programa: Engenharia de Transportes

A distribuição espacial da demanda por transporte gera uma disposição heterogênea da oferta e do uso de energia e, conseqüentemente, das emissões atmosféricas em uma economia. A transição energética, expressa como intenção pela maioria dos países em suas NDCs, requer não apenas o entendimento do padrão de uso nacional de energia, mas o arranjo de sua demanda, considerando a contribuição de cada ente subnacional. Apesar de sua relevância, esse fenômeno tem sido pouco abordado pelo campo da modelagem energético-climática e predominantemente ausente nas abordagens de referência usadas pelos países-membros da UNFCCC. Esta tese teve como objetivo desagregar espacialmente inventários de uso de energia e emissões atmosféricas do setor de transportes, suportando estruturas de MRV subnacionais. Para isso, foi desenvolvido e aplicado um modelo multinível que calcula as emissões históricas e as desagrega espacialmente, provendo indicadores detalhados por entidade subnacional. Os resultados apresentam uma acurácia acima de 92% quando comparados a valores de estudos referência de estados brasileiros. Implicações futuras podem envolver a atualização do procedimento atualmente utilizado pelo MCTI nas estimativas anuais do Brasil e comunicações nacionais à UNFCCC, bem como auxiliar entidades subnacionais com medições consistentes para o desenvolvimento de políticas climáticas locais.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

SPATIAL DISAGGREGATION OF ENERGY AND ATMOSPHERIC EMISSIONS
INVENTORIES IN THE TRANSPORT SECTOR FOR MEASUREMENT,
REPORTING AND VERIFICATION

George Vasconcelos Goes

March/2023

Advisor: Márcio de Almeida D'Agosto

Department: Transport Engineering

The spatial distribution of transport demand generates a heterogeneous arrangement of energy supply and consumption and, consequently, of atmospheric emissions in an economy. The energy transition, expressed as an intention by most countries in their NDCs, requires not only understanding the pattern of national energy use, but the arrangement of its demand, considering the contribution of each subnational entity. Despite its relevance, this phenomenon has been little addressed by the field of energy-climate modeling and predominantly absent in the reference approaches used by UNFCCC parties. This thesis aimed to spatially disaggregate inventories of energy use and atmospheric emissions from the transport sector, supporting subnational MRV structures. A *multitier* model that calculates historical emissions and spatially disaggregates the results was developed and applied, providing detailed indicators to assist subnational entities in their climate policies. The results show an accuracy above 92% when comparing the data disaggregated by the model to values from reference studies in Brazilian states. Future implications may involve updating the procedure currently used by the MCTI in Brazil's annual estimates and national communications to the UNFCCC, as well as assisting subnational entities in the development of local climate policies with consistent measurements.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1 Discussão	1
1.1.1 O problema a ser investigado	2
1.1.2 Questões de pesquisa.....	6
1.1.3 Objetivos da pesquisa.....	7
1.2 Delimitação, premissas e hipóteses	7
1.3 Procedimentos de pesquisa.....	10
1.4 Relevância do tema e originalidade.....	13
1.5 Estrutura da pesquisa	13
2. Base científica em inventários nacionais e estruturas de MRV: pressupostos teórico-metodológicos	15
2.1 Setores da economia	15
2.2 Escopo das emissões.....	16
2.2.1 Classificação dos gases de efeito estufa	17
2.2.2 Potencial de aquecimento global	19
2.3 Níveis de detalhamento das estimativas	20
2.3.1 Tiers: abordagens a partir de fatores de emissão.....	20
2.3.2 Top-down, bottom-up e ASIF: Abordagens de referência e setorial.....	23
2.4 Estruturas de MRV e inventários de emissões.....	28
2.5 Considerações do Capítulo 2	31
3. Protocolos para desagregação espacial de inventários nacionais.....	32
3.1 Pesquisas sistemática e documental.....	32
3.2 Pesquisa complementar em Mensuração, Relato e Verificação	44
3.3 Considerações do Capítulo 3	48
4. Método	50
4.1 Fase 1: Inventário nacional.....	52
4.2 Fase 2: Estimativa da atividade de transporte	57
4.3 Fase 3: Mensuração, Relato e Verificação	58
4.4 Fase 4: Desagregação espacial <i>tier</i> 1	61
4.5 Fase 5: Desagregação espacial <i>tiers</i> 2 e 3.....	63
4.6 Considerações do Capítulo 4	64

5. Experimento	65
5.1 Material base.....	65
5.2 Inventário nacional	68
5.2 Desagregação espacial de inventário nacional	82
5.2.1 Desagregação espacial tier 1	82
5.2.2 Desagregação espacial tiers 2 e 3.....	104
5.3 Mensuração, Relato e Verificação.....	112
5.4 Considerações do Capítulo 5	114
Considerações finais e implicações	116
Referências	121
Apêndice A: Workshop e discussão com especialistas	135
Apêndice B: Indicadores por entidade subnacional	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Procedimentos teórico-metodológicos da pesquisa.	10
Figura 2.1. Árvore de decisão para escolha dos <i>tiers</i> no transporte rodoviário e ferroviário	22
Figura 2.2. Abordagens de referência e setoriais da UNFCCC simplificadas	26
Figura 2.3. Abordagens setorial ASIF	27
Figura 2.4. Escopo de estruturas de MRV	29
Figura 3.1. Procedimento desenvolvido para a condução da revisão sistemática	33
Figura 3.2. Países de origem dos artigos selecionados.....	36
Figura 3.3. Países de aplicação dos artigos selecionados	36
Figura 3.4. Países de aplicação dos artigos inclusos	37
Figura 4.1. Procedimento desenvolvido para a desagregação espacial de inventários nacionais e estruturas de MRV	51
Figura 4.2. Procedimento para estimativa nacional emissões atmosféricas e uso de energia	54
Figura 4.3. Estrutura de MRV aplicada a inventários desagregados.....	60
Figura 5.1. Atividade e divisão modal do transporte de carga	69
Figura 5.2. Atividade de transporte de passageiros	69
Figura 5.3. Licenciamento de veículos leves e pesados por tecnologia	71
Figura 5.4. Frota circulante por categoria de veículo	72
Figura 5.5. Taxa de motorização no Brasil.....	72
Figura 5.6. Uso de energia no setor de transportes.....	73
Figura 5.7. Uso de energia por fonte	73
Figura 5.8. Histórico do uso de energia no transporte de carga	74
Figura 5.9. Uso de energia no transporte de passageiros.....	74
Figura 5.10. Importação de diesel mineral e gasolina no Brasil.....	75
Figura 5.11. Emissões de GEE diretos do setor de transportes	76
Figura 5.12. Emissões dos GEE diretos CH ₄ , N ₂ O e HFC 134a	77
Figura 5.13. Emissões de GEE indiretos do transporte rodoviário	78
Figura 5.14. Emissões de poluentes atmosféricos do transporte rodoviário	78
Figura 5.15. Comparação do volume de CO ₂ emitido pelo setor de transportes.....	80
Figura 5.16. Comparação do volume emitido pelo transporte rodoviário.....	80

Figura 5.17. Distribuição espacial de variáveis <i>proxy</i> para setores econômicos.....	83
Figura 5.18. Uso de energia desagregado por entidade subnacional.....	94
Figura 5.19. Divisão do uso de energia subnacional por modo de transporte.....	95
Figura 5.20. Divisão do uso de energia subnacional por subatividade rodoviária	96
Figura 5.21. Participação de energia fóssil e renovável por entidade subnacional	98
Figura 5.22. Dependência do Diesel mineral nas entidades subnacionais	99
Figura 5.23. Dependência da gasolina A nas entidades subnacionais.....	101
Figura 5.24. Emissões atmosféricas desagregadas por entidade subnacional	102
Figura 5.25. Intensidade de carbono nas entidades subnacionais.....	102
Figura 5.26. Dependência da gasolina A nas entidades subnacionais.....	103
Figura 5.27. Frota circulante de SP por categoria de veículo.....	109
Figura 5.28. Taxa de motorização em SP	109
Figura 5.29. Uso de energia no transporte rodoviário de SP.....	110
Figura 5.30. Emissões de GEE diretos do setor de transportes	110
Figura 5.31. Emissões dos GEE diretos e indiretos não-CO ₂ em SP	111
Figura 5.32. Emissões dos demais poluentes atmosféricos em SP.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais GEE diretos e indiretos	17
Tabela 2.2. Principais GEE diretos e indiretos	19
Tabela 3.1. Elementos coletados e analisados na revisão sistemática.....	34
Tabela 3.2. Síntese dos artigos inclusos na revisão sistemática	38
Tabela 3.3. Indicadores de MRV coletados na revisão documental.....	45
Tabela 5.1. Dados de entrada para calcular e desagregar o inventário nacional e prover indicadores de MRV	67
Tabela 5.2. Comparação da intensidade energética média de cada modo de transporte	81
Tabela 5.3. Matrizes para abatimento da energia consumida por setores não-transportes	84
Tabela 5.4. Abatimento do volume de energia consumido por outros setores e de <i>bunker</i>	86
Tabela 5.5. Matrizes para alocação da energia de do setor de transportes em cada modo	87
Tabela 5.6. Critérios de enquadramento das subatividades do transporte rodoviário	89
Tabela 5.7. Comparação entre os resultados obtidos e estudos de referência	92
Tabela 5.8. Comparação entre os resultados obtidos e estudos de referência.....	105
Tabela 5.9. Critérios de enquadramento das categorias de veículo.....	106
Tabela 5.10. Comparação entre os resultados obtidos e estudos de referência.....	107
Tabela 5.11. Indicadores de MRV por entidade subnacional (ano 2021)	113
Tabela A.1. Principais instituições e empresas participantes do IV WCPUET	136
Tabela B.1. Indicadores de MRV por entidade subnacional (ano 2015).....	137
Tabela B.2. Indicadores de MRV por entidade subnacional (ano 2010).....	138
Tabela B.3. Indicadores de MRV por entidade subnacional (ano 2005).....	139

LISTA DE SIGLAS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil
ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASIF – *Activity, Structure, Intensity and Fuel*
CH₄ – Metano
CO – Monóxido de carbono
CO₂ – Dióxido de Carbono
CO_{2e} – Dióxido de Carbono Equivalente
COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DETANTRAN – Departamento Nacional de Trânsito
DPVAT – Seguro Obrigatório de Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Vias Terrestres
EUA – Estados Unidos da América
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
GEE – Gases de Efeito Estufa
GWP – *Global Warming Potential*
GTP – *Global Temperature Potential*
HC – Hidrocarboneto
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA – *International Energy Agency*
IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
MP – Material Particulado
NAMA – *Nationally Appropriate Mitigation Actions*
N₂O – Óxido nitroso
NDC – *Nationally Determined Contribution*
NO_x – Óxidos de Nitrogênio
NMVOC – Compostos orgânicos não voláteis
ONU – Organização das Nações Unidas.
PIB – Produto Interno Bruto
SIG – Sistema de Informação Geográfica
Tep – Tonelada Equivalente de Petróleo
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

LISTA DE UNIDADES

% – Porcentagem

\$ – Cifrão

g – Grama

Gg – Gigagrama

h – Hora

kg – Quilograma

km – Quilômetro

kW – Quilowatt

l – Litro

m³ – Metro cúbico

t – Tonelada

TJ – Terajoule

und – Unidade

1. Introdução

Este Capítulo discorre sobre o objeto de estudo e a descrição do problema que motivou a pesquisa. Posteriormente, as questões de pesquisa, os objetivos do trabalho e as justificativas serão apresentadas, ou seja, a relevância de sua contribuição. Após a justificativa, designa-se a estrutura do trabalho.

1.1 Discussão

Apesar do padrão de consumo energético global permanecer relativamente estável e dominado por combustíveis fósseis (KAYGUSUZ, 2012), o setor de transportes experimenta estímulos à diversificação da matriz energética, seja em decorrência das metas de mitigação discutidas sob o Acordo de Paris da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) ou da busca por maior segurança energética em virtude da variação do preço do petróleo (KRUYT *et al.*, 2009).

A estimativa do potencial de economia energética do setor, responsável por cerca de 18% da participação no consumo energético e 17% das emissões antrópicas globais (EIA, 2021, CLIMATE WATCH, 2021), requer a utilização de uma abordagem multissetorial para modelar não somente o uso direto da energia, mas a sua eficiência. Esse raciocínio também pode ser utilizado para modelos energético-climáticos sob a forma de inventários de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e poluentes atmosféricos, em decorrência da correlação entre as variáveis ambientais e econômicas (SAIDI e HAMMAMI, 2015, GOES *et al.*, 2020a).

Diversos atores da sociedade oriundos, por exemplo, da academia, do governo e da iniciativa privada têm reconhecido a importância da realização de estimativas de uso de energia e emissões atmosféricas. A problemática é potencializada ao se estudar o setor de transportes, dado que as suas emissões crescem em um ritmo mais intenso do que nos demais setores da economia (SIMS *et al.*, 2014). Para essas estimativas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) recomenda a utilização de abordagens que calculam as emissões partir da desagregação setorial do uso final de energia (IPCC, 2006).

Além de quantificar, os países buscam compreender o padrão das emissões atmosféricas e uso de energia em seus territórios para identificar e endereçar as medidas

de mitigação prioritárias. Não obstante, a energia consumida para suprir as atividades de transporte varia significativamente entre entidades subnacionais¹, tanto no consumo total quanto na participação de cada fonte (WANG e JIANG, 2017). Isto decorre da diversidade de características geográficas, níveis de desenvolvimento econômico, uso do solo, valores e cultura da sociedade, disponibilidade de fontes de energia locais etc.

Dessa forma, a distribuição espacial da demanda por transporte gera uma disposição desigual da oferta e do uso de energia e, conseqüentemente, das emissões dentro de um país. Apesar da relevância, esse fenômeno é pouco abordado pela literatura especializada, sendo predominantemente ausente nas abordagens de referência utilizadas por países-membro da UNFCCC para estimativas de GEE nacionais e de poluentes atmosféricos. Essa conjuntura pode gerar impedâncias ao processo de tomada de decisão, na ocasião em que a comunidade acadêmica, entidades privadas e governos buscam instrumentos que facilitem a transição energética.

Parte das impedâncias envolvem as atividades de mensuração, relato e verificação (MRV) de emissões para atingimento das metas contidas nas Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas (NAMA) e nas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC)², dadas as lacunas quanto à disponibilidade de mecanismos para identificar onde e como se comportam espacialmente as emissões estimadas para o país (CHINA, 2015; SINGH *et al.*, 2016). Isso pode restringir o potencial de atendimento das ações de melhoramento da eficiência energética do setor e da mitigação das emissões gases nocivos.

1.1.1 O problema a ser investigado

O setor de transportes engloba uma multiplicidade de atividades relevantes para a mobilidade dos passageiros e a circulação de cargas, desempenhando um papel importante na atividade econômica de uma sociedade (WANG *et al.*, 2011). Por essa razão, trata-se de uma fonte significativa de poluentes atmosféricos responsáveis pela degradação da qualidade do ar dentro dos centros urbanos, com efeitos subsequentes na saúde humana e no ecossistema.

¹ Uma divisão administrativa de um país, por exemplo, estados, províncias ou distritos.

²NAMA e NDC representam os esforços de cada país para reduzir as emissões nacionais e se adaptar aos impactos das mudanças climáticas.

Além disso, o transporte afeta o ambiente global, sendo responsável por emissões cada vez maiores de GEE diretos e indiretos (GASPARATOS *et al.*, 2009). Diferentemente de problemas ambientais espacialmente localizados como a poluição atmosférica em cidades, as consequências da mudança climática global não são restritas a fronteiras (ALTHOR *et al.*, 2016).

É provável que o consumo de energia do setor aumente ainda mais com o crescimento econômico e populacional, a rápida industrialização, a urbanização e o desenvolvimento agrícola das nações (WANG *et al.*, 2011, UNITED NATIONS, 2018). Assim, a diminuição das externalidades negativas oriundas de uma economia baseada em altos índices de intensidade carbono e de energia parte da compreensão do padrão das emissões atmosféricas e de suas fontes. Além disso, é importante o monitoramento e relato regular dos instrumentos de mitigação políticos e financeiros. Essa questão pode ser abordada a partir de procedimentos de MRV.

Expandir os procedimentos de MRV para incluir medidas de mitigação é uma oportunidade para apoiar os países em seus esforços para melhorar seu desempenho climático ao longo do tempo, consistente com o desenvolvimento sustentável (NIEDERBERGER, KIMBLE, 2011). No entanto, apesar de o conceito de MRV englobar diversos níveis organizacionais, de blocos econômicos a organizações privadas, sua aplicação a partir de inventários de emissões atmosféricas e uso de energia tem sido restrita a nações, visando principalmente monitorar os compromissos ambientais assumidos (VIEWING, 2017).

Além disso, a condução de inventários nacionais é uma atividade onerosa em tempo, custo e recursos humanos, especialmente quando se utiliza uma abordagem *bottom-up*, o que torna complexo estimar sequencialmente as emissões de diversas entidades subnacionais em um mesmo período (NICHOLLS, 2015). Dado que abordagens detalhadas consideram milhares de fontes móveis, que consomem fontes energéticas distintas, é possível que o somatório de inventários estaduais não se enquadre com o esperado para o país. Caso os resultados dos inventários estaduais não sejam ajustados com dados nacionais, a incerteza associada se torna significativa.

Como alternativa, a literatura especializada tem utilizado métodos de decomposição como forma de compreender o impacto de diferentes fatores regionais no padrão de consumo energético e de emissões nacionais. Convencionalmente, utilizam-se métodos como análises de regressão, *Kaya identity*, *structural decomposition analysis*

(SDA), *index decomposition analysis* (IDA) e *logarithmic mean division index* (LMDI) (WANG *et al.*, 2011; CHEN *et al.*, 2019). Em essência, os métodos buscam identificar as forças direcionadoras que afetam o padrão de emissões de um país, mas não desagregam inventários em entidades subnacionais (CAO *et al.*, 2019).

Modelos que desagreguem espacialmente inventários nacionais são importantes para que cada estado compreenda a sua participação no resultado nacional e o seu potencial, identificando os elementos que mais contribuem para as emissões nacionais, o que pode ser reportado sob uma estrutura de MRV. Em caso de limitações de recursos para elaboração de inventários subnacionais independentes, pouca disponibilidade de dados setoriais ou inconsistências de informações, a utilização de protocolos para alocar as estimativas nacionais aos estados pode melhorar a consistência das análises e direcionar ações, considerando o potencial de cada estado. É possível, portanto, dar autonomia aos estados, estabelecendo metas detalhadas e individualizadas, mesmo no caso de não comprometimento ou declínio por parte do poder executivo nacional.

Em 2017, os Estados Unidos anunciaram a retirada do Acordo de Paris, um processo que, embora concluído ao final de 2020, foi revogado em 2021 pelo governo seguinte. Nesse período, os estados, cidades e empresas desse país contribuíram para preencher lacunas deixadas pela inação federal (URPELAINEN e VAN DE GRAAF, 2018). Do mesmo modo, a partir de 2019, o governo brasileiro acenou para a desaceleração de estratégias de desenvolvimento de baixo carbono³, além de atualizar primeira versão da NDC, reduzindo a sua ambição global (LA ROVERE, 2021). Essas ações revertem um posicionamento histórico do Brasil de liderança na agenda climática global.

Na outra vertente, a condução independente de inventários estaduais pode acarretar erros de alocação entre setores econômicos, consumo *bunker*/internacional ou dupla contagem, por exemplo, da frota circulante, movimentação de aeronaves, locomotivas etc. Para contornar essa questão, advoga-se necessária a visão holística entre

³ Desde discursos públicos a medidas concretas, como: facilitação da exploração de recursos minerais e hídricos em áreas indígenas (Projeto de Lei nº 191/2020 – em tramitação); isenção de tarifas de importação para o volume de 750 milhões de litros por ano de etanol anidro dos Estados Unidos em 2020 (ANP, 2020); redução do volume da mistura regulamentada de biodiesel no diesel mineral de 13% para 10% em 2021 (CNPE, 2021), mantendo esta proporção até o momento; redução a zero das tarifas incidentes sobre combustíveis em 2022 (Lei Complementar 192/2022); redução da incidência de ICMS sobre combustíveis em 2022 (Lei Complementar 194/2022), dentre outras.

os modos de transporte e estados, o que pode ser factível com a desagregação espacial de um inventário nacional de emissões.

No Brasil, as emissões oriundas do setor de transportes correspondem a 13% do total emitido (BRASIL, 2020), enquanto o consumo final de energia representa 33% (EPE, 2022). Até 2020, os inventários de emissões atmosféricas desenvolvidos não contemplavam a representatividade dos estados nas emissões, sejam os inventários exclusivos do setor de transportes (BRASIL, 2011, 2014) ou multissetoriais (BRASIL, 2016). Contudo, em 2021, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), a partir de esforços iniciados na 4ª Comunicação, publicou uma estimativa das emissões estaduais brasileiras, com a mesma linha de base da comunicação nacional (1990-2016) (BRASIL, 2020; 2021).

A iniciativa considera o consumo energético dos estados como variável de desagregação apenas para os gases CO₂, CH₄ e N₂O. O método utilizado pelo estudo considera o consumo energético como variável de alocação das emissões aos estados, sendo, portanto, um método de uma camada. Por dependerem de um maior nível de detalhes para serem modelados, os gases CH₄ e N₂O foram desagregados com base nas suas proporções em relação às emissões nacionais de CO₂. Apesar de ser um passo inicial, o método não incorpora, por exemplo, dados de atividade como frota, passageiros e cargas movimentadas e a rede instalada de cada modo de transporte. Ademais, não há separação entre as atividades de passageiros e de carga, impossibilitando análises individualizadas, por exemplo, as demandadas em uma estrutura subnacional de MRV.

Esse problema poderia ser contornado ao se modelar a desagregação com base em uma caracterização detalhada do setor de transportes, em que dados descentralizados de atividade como frota, rede instalada e movimentação de mercadorias e passageiros, são incorporados ao processo. Desagregações com alto nível de incerteza podem comprometer a definição de diretrizes e instrumentos políticos subnacionais, uma vez que os resultados estimados não condizem com as capacidades locais de comprometimento.

No cenário internacional, os inventários vigentes de alguns dos maiores emissores globais como China e União Europeia atualmente não contemplam a desagregação das emissões e consumo energético por entidades subnacionais⁴ (CHINA, 2018, EEA, 2022). Na visão de Oliveira *et al.* (2020), a desagregação de inventários nacionais em entidades

⁴ As emissões nacionais da Finlândia, Itália e do Reino Unido se originam da soma de duas ou mais entidades subnacionais, portanto, não representam a desagregação de um inventário nacional.

subnacionais, inclusive municípios, pode viabilizar novas análises e aprofundar a discussão sobre a precificação do carbono. Tal mecanismo ainda não foi regulamentado no Brasil⁵, embora incipiente em países da América Latina como Chile, Colômbia e México.

1.1.2 Questões de pesquisa

A identificação do problema provoca a elaboração de questões de pesquisa que fundamentam a definição do objetivo geral e de objetivos específicos. Isto posto, buscase investigar a problemática a partir da seguinte questão central: ‘Como desagregar espacialmente inventários detalhados de uso de energia e emissões atmosféricas do setor de transportes, suportando estruturas de MRV subnacionais?’.

Sistematicamente, a questão é desdobrada em questionamentos específicos, de menor abrangência, no intuito de identificar lacunas ou aprimorar procedimentos existentes:

1. Como relacionar estruturas de MRV e inventários nacionais de consumo energético e emissões atmosféricas?
2. Quais indicadores podem ser desagregados, visando a mensuração, relato e verificação do setor de transportes brasileiro?
3. Como identificar e selecionar variáveis *proxy* para alocar o consumo energético nacional em entidades subnacionais?
4. Como identificar e relatar o perfil de atividade, uso de energia e emissões atmosféricas de um país por entidade subnacional?
5. Como analisar a consistência das informações e validar os resultados dos inventários modelados?

Para responder as questões de pesquisa, uma série de objetivos complementares foram estabelecidos.

⁵ Apesar da existência dos Projetos de Lei (PL) nº 528/2021 e 290/2020 (apensados ao PL 2148/2015, em tramitação no congresso).

1.1.3 Objetivos da pesquisa

Diante da contextualização da problemática, o objetivo central do estudo é ‘desagregar espacialmente inventários de uso de energia e emissões atmosféricas do setor de transportes, suportando estruturas de MRV subnacionais’. Especificamente, busca-se:

1. Identificar como relacionar estruturas de MRV e inventários nacionais de consumo energético e emissões atmosféricas;
2. Identificar e selecionar os indicadores de MRV que podem ser utilizados para a avaliação do histórico e das estimativas desagregadas do setor;
3. Identificar e selecionar variáveis *proxy* para alocar o consumo energético em entidades subnacionais;
4. Desenvolver um procedimento de desagregação espacial de inventários de uso de energia e emissões atmosféricas do setor de transportes, suportando estruturas de MRV subnacionais; e
5. Aplicar o procedimento, por meio de experimento, e analisar a consistência das informações e validar os resultados dos inventários modelados.

1.2 Delimitação, premissas e hipóteses

A pesquisa propõe o desenvolvimento e a aplicação de um método que aloque as estimativas de consumo energético e emissões atmosféricas do setor de transportes de um país para as entidades subnacionais, visando estabelecer e alimentar uma estrutura de MRV. Como emissões atmosféricas, são considerados os GEE diretos e indiretos e poluentes atmosféricos oriundos da queima de combustíveis por fontes móveis.

Como entidade subnacional, considera-se qualquer subdivisão da fronteira de um país, desde regiões geográficas a estados e municípios. Como setores econômicos, considera-se a lista indicada nos balanços energéticos nacionais (BEN). O nível de desagregação do método desenvolvido neste estudo é dependente da disponibilidade de dados locais consistentes⁶. Ademais, delimita-se o escopo da pesquisa para apenas o transporte doméstico de carga e passageiros, uma vez que as variáveis consideradas para

⁶ Com parâmetros dentro da amplitude mínima e máxima da literatura. Por exemplo, ao dividir a energia consumida pela atividade de transporte, comparando o resultado com a intensidade energética por modo de transporte nacional ou de outros países.

uma abordagem desagregada⁷ diferem significativamente entre países. Esta delimitação segue o padrão de inventários nacionais (BRASIL, 2011, 2014, 2016, EEA, 2022, EPA, 2022). Apesar disso, o consumo de *bunker* é contabilizado para fins de alocação da energia entre setores econômicos e modos de transporte.

Este trabalho considera os modos aéreo, aquático, ferroviário, rodoviário e dutoviário, ou seja, amplia-se o escopo convencionalmente considerado em inventários anteriores do país, que não modelam dutovias (BRAZIL, 2011, 2014, 2016, 2020). Modelar dutovias é importante para o diagnóstico do setor, sobretudo em relação à divisão modal baseada na atividade de transporte.

O intervalo de observação para as estimativas é anual, conforme o padrão utilizado em comunicações nacionais de emissões atmosféricas. Assim, os principais GEE diretos identificados na literatura (CO₂, N₂O, CH₄ e HFC 134a) e indiretos (CO, NMVOC e NO_x), além dos poluentes atmosféricos de ação local como Material Particulado (MP₁₀), Aldeídos (RCHO), Dióxido de Enxofre (SO₂) e emissões evaporativas⁸ são modelados para o modo rodoviário. Para os demais modos, são consideradas as emissões dos GEE diretos CO₂, N₂O e CH₄.

A modelagem do gás HFC, responsável por cerca de 2% do volume de CO₂ emitido, é importante para verificar o impacto de sucateamentos e emissões fugitivas da presença de ar-condicionado não somente em veículos fósseis, mas em veículos de zero emissão. Na outra vertente, a modelagem de RCHO visa estimar uma externalidade característica do uso intensivo de etanol em veículos do tipo *flexible-fuel*, analisando possíveis *trade-offs* na priorização de políticas baseadas no uso intensivo de biocombustíveis em relação ao estímulo a veículos de zero emissão.

Em relação ao consumo energético do transporte aéreo, a gasolina de aviação não é adicionada aos consumos anuais de querosene, mas relatada separadamente. Conforme o (IPCC, 2006), as emissões causadas pelo consumo de gasolina de aviação são calculadas usando fator de emissão e valores caloríficos adaptados, mediante abordagens *tier 1*. Por fim, para o transporte rodoviário, algumas categorias de veículos não foram consideradas, seja em decorrência da participação irrisória na frota circulante (veículos pesados com motores do ciclo Otto) ou de restrições legais de licenciamento⁹.

⁷ Fatores de emissão, rendimento energético, intensidade de uso, perfil da frota, tipos de combustíveis etc.

⁸ Emissões de vapor de combustível (hidrocarbonetos não metano) mensurada pela concentração de hidrocarbonetos em câmara selada (CETESB, 2020).

⁹ Automóveis com motores do ciclo Diesel com capacidade de carga inferior a 1.000 kg.

A partir da delimitação da pesquisa, é necessário estabelecer as premissas e hipóteses de referência para subsidiar o desenvolvimento do método de pesquisa. As premissas são informações essenciais que servem de base para um raciocínio. Neste estudo, considera-se:

1. A inexistência de um ou mais procedimentos que contemplem a estruturação, para todos os modos de transporte, de um histórico (linha de base) de consumo energético e de emissões de GEE e poluentes atmosféricos, desagregando espacialmente as estimativas para as entidades subnacionais;
2. Convencionalmente, as estruturas de MRV de emissões são utilizadas para avaliar o perfil nacional de emissões com foco em GEE;
3. Existe uma alta correlação entre a atividade de transporte¹⁰ e o PIB, absoluto ou *per capita*;
4. Usualmente, os inventários de emissão não contemplam HFC, tampouco os GEE indiretos NMVOC, CO e NO_x e os poluentes atmosféricos MP₁₀, SO₂, RCHO e emissões evaporativas.

As hipóteses deste estudo, que são princípios a partir dos quais se pode deduzir um determinado conjunto de consequências, são:

1. É possível desenvolver um procedimento que, a partir da estimativa nacional do consumo energético e das emissões atmosféricas, incluindo GEE e poluentes, desagregue as informações em entidades subnacionais de forma aplicar estruturas de MRV regionais;
2. É possível que o procedimento seja aplicado em qualquer nível de desagregação, desde regiões e estados a municípios, na condição da existência de dados consistentes;
3. O procedimento pode ser reproduzido em diversas escalas por meio de experimentos, utilizando protocolos científicos que o validem;
4. A estimativa desagregada de consumo energético e emissões contribui para o estudo de instrumentos políticos no setor de transportes.

¹⁰ Estimada em tonelada-quilômetro (t-km) ou passageiros-quilômetros (p-km) transportados.

1.3 Procedimentos de pesquisa

A abordagem metodológica utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa é baseada nos objetivos específicos do estudo. A estrutura do método é, então, apresentada por capítulos (Figura 1.1).

Capítulo 1 <i>Introdução</i> Pesquisas bibliográficas narrativa e documental <input type="checkbox"/> Discussão preliminar e identificação do problema <input type="checkbox"/> Premissas e hipóteses <input type="checkbox"/> Objetivos <input type="checkbox"/> Delimitação da pesquisa <input type="checkbox"/> Método de pesquisa	Capítulo 4 <i>Procedimento para desagregar inventários nacionais</i> Pesquisas bibliográficas narrativa e documental <input type="checkbox"/> Procedimento estruturado
Capítulo 2 <i>Base científica para inventários: pressupostos teórico-metodológicos</i> Pesquisas bibliográficas narrativa e documental <input type="checkbox"/> Apresentar os principais conceitos sobre inventários de uso de energia e emissões e MRV <input type="checkbox"/> Investigar como a literatura tem abordado o objeto de estudo <input type="checkbox"/> Identificar os principais modelos de inventários <input type="checkbox"/> Selecionar indicadores setoriais para estruturas de MRV	Capítulo 5 <i>Experimento</i> Pesquisas bibliográficas narrativa e documental <input type="checkbox"/> Seleção de abordagem por modo de transporte <input type="checkbox"/> Coleta e análise de consistência dos dados <input type="checkbox"/> Estimativa da atividade de transporte, do consumo energético e das emissões de GEE e poluentes atmosféricos <input type="checkbox"/> Desagregação das estimativas para as entidades subnacionais <input type="checkbox"/> Validação dos resultados <input type="checkbox"/> Análise dos resultados e indicadores de MRV
Capítulo 3 <i>Revisão da literatura: protocolos para desagregar inventários nacionais</i> Pesquisas bibliográficas sistemática e documental <input type="checkbox"/> Identificar procedimentos para desagregar inventários nacionais <input type="checkbox"/> Identificar variáveis significativas aos modelos <input type="checkbox"/> Identificar principais critérios de rateio <input type="checkbox"/> Verificar formas de validação dos dados	Capítulo 6 <i>Considerações finais e implicações políticas</i> <input type="checkbox"/> Considerações finais e implicações políticas <input type="checkbox"/> Limitações da pesquisa <input type="checkbox"/> Sugestões para estudos futuros

Fonte: autor.

Figura 1.1. Procedimentos teórico-metodológicos da pesquisa.

A depender da complexidade do fenômeno, métodos diferentes são empregados, tais como: pesquisa bibliográfica narrativa, sistemática, documental e estudo de caso. A pesquisa bibliográfica é utilizada para identificar na literatura especializada o que os autores abordam sobre estimativas de uso de energia e emissões atmosféricas, especificamente os métodos e ferramentas disponíveis. Busca-se identificar lacunas e oportunidades de melhorias. Segundo Gil (2008), a pesquisa bibliográfica

[...] é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. [...] A principal vantagem da pesquisa bibliográfica reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente. (GIL, 2008, p.50).

Nesse tocante, advém da necessidade de identificar e estruturar, mediante o estado da arte, os diferentes temas componentes do objeto de estudo, propiciando um embasamento teórico inicial necessário para o prosseguimento das etapas metodológicas subsequentes. As duas abordagens de pesquisa bibliográfica utilizadas neste estudo são revisões narrativas e sistemáticas da literatura.

Os métodos de revisão englobam uma ampla variedade de propósitos para responder questões de pesquisas ou identificar lacunas no conhecimento (BOOTH *et al.*, 2016). Convencionalmente, os artigos de revisão utilizam uma abordagem narrativa. Essas abordagens são abrangentes e cobrem uma ampla gama de questões dentro de um determinado tópico, mas não necessariamente declaram ou seguem protocolos sobre a busca de evidências.

As revisões narrativas típicas não revelam como as decisões foram tomadas sobre a relevância dos estudos e a validade dos trabalhos incluídos (COLLINS e FAUSER, 2005). Outrossim, uma revisão narrativa analisa a literatura disponível em livros e revistas, baseada na interpretação e avaliação crítica do autor (ROTHER, 2007, CALIL SALLUM *et al.*, 2012). Na outra vertente, Fink (2005) conceitua uma revisão sistemática da literatura como um procedimento sistemático, explícito e replicável para identificar, avaliar e sintetizar um conjunto de estudos e registros sobre um determinado objeto.

A revisão sistemática visa relatar o estado de um campo particular de conhecimento (ROWLEY; SLACK, 2004), seguindo protocolos para localizar estudos existentes, selecionar e avaliar as principais contribuições. Kitchenham *et al.* (2009) sintetizam os motivos comuns para se conduzir uma revisão sistemática: (i) para resumir as evidências existentes relativas a um procedimento ou tecnologia; (ii) para identificar quaisquer lacunas em pesquisas atuais, a fim de sugerir caminhos para investigações adicionais; ou (iii) para fornecer uma estrutura ou contexto para posicionar adequadamente novas atividades de pesquisa.

Os autores argumentam que revisar a literatura em uma abordagem sistemática auxilia o autor a incorporar consistência ao estudo, por meio de rigor metodológico, sendo um método expoente de síntese de estudos. Assim, abordagens sistemáticas são utilizadas para reduzir potenciais vieses de seleção de pesquisas primárias e da avaliação e síntese dos estudos (BOOTH *et al.*, 2016).

Em concordância com o raciocínio de Collins e Fauser (2005), advoga-se que para expor e discutir o conhecimento de base, conceitos em evolução e controvérsias a respeito

de um fenômeno, é oportuna a flexibilidade de uma revisão narrativa com ampla cobertura e escolhas situacionais sobre a inclusão de evidências. Fornece-se, portanto, uma linha cronológica a respeito da evolução do problema e como ele tem sido abordado pela literatura. Em contraste, o rigor de uma revisão sistemática é necessário para a eficácia da caracterização, diagnóstico e proposição de alternativas ao problema. A escolha é aberta para muitos outros tópicos científicos, com o mérito da transparência e reprodutibilidade. Portanto, entende-se que ambas as abordagens de revisão são relevantes, sendo aplicáveis em contextos específicos.

Neste trabalho, utiliza-se uma revisão sistemática no Capítulo 3 para identificar e selecionar métodos para reduzir a escala de inventários nacionais. Adota-se a revisão narrativa sobretudo na identificação do problema (Capítulo 1) e no estabelecimento da linha cronológica de inventários nacionais e MRV de medidas de mitigação (Capítulo 2).

A pesquisa documental, por sua vez, abrange uma ampla variedade de documentos, utilizando protocolos para a seleção, compreensão e análise de informações (CHIZZOTTI, 2018). A aplicabilidade da pesquisa documental ocorre da necessidade de levantamento de dados primários e secundários sobre um assunto que não necessariamente são expostos em artigos científicos ou livros.

Para efeito deste trabalho, pesquisa documental, assim como a bibliográfica, é utilizada para identificar os dados de entrada do modelo, por exemplo, histórico de vendas de veículos, adimplentes com o Seguro Obrigatório de Danos Pessoais Causados por Veículos Automóveis de Via Terrestre (DPVAT) etc. Ademais, são trabalhados os principais relatórios técnicos de instituições governamentais ou entidades independentes sobre estimativas nacionais, identificando métodos e ferramentas para inventários que não foram divulgados por outros meios (por exemplo, artigos científicos).

Por último, a pesquisa aplicada busca compreender a dinâmica de um determinado fenômeno. Trata-se da combinação de métodos de coleta e processamento de dados, com eventos comportamentais contemporâneos (PERDIGÃO *et al.*, 2012). Ao contrário das pesquisas bibliográfica e documental, investigações de natureza aplicada apresentam complexidades metodológicas e éticas mais complexas (VILAÇA, 2010), em virtude da dificuldade de se isolar o objeto de estudo das demais variáveis que o afetam.

A pesquisa aplicada é conduzida no Capítulo 5 (experimento), estruturada sob a forma de um estudo de caso. Nesta fase, o método de desagregação espacial de emissões

e energia, fruto do objetivo central desta pesquisa, é aplicado e avaliado com base em indicadores de MRV e inventários estaduais.

1.4 Relevância do tema e originalidade

Historicamente, o setor de transportes tem relevância significativa no consumo energético e emissões globais, exigindo uma modelagem complexa (BHUTTO *et al.*, 2016). Os estudos baseados em inventários nacionais de emissões são amplos e consolidados na literatura, no entanto, em suma são associados a dados agregados (*top-down*) de energia ou, quando desagregados (*bottom-up*), têm o objetivo de realizar somente estimativas nacionais e com foco em GEE.

Ao analisar a vertente relacionada às estruturas de MRV e seus impactos regionais, observa-se uma lacuna no conhecimento quanto à existência de estudos que busquem inventariar o consumo energético e emissões nacionais, desagregar detalhadamente os resultados entre setores econômicos, modos de transportes, atividades e subatividades em entidades subnacionais e aplicar estruturas de MRV para acompanhar o desenvolvimento de políticas sustentáveis. A relevância deste estudo decorre do fato de os inventários de emissões e uso de energia e as estruturas de MRV serem objetos de estudo complementares, porém ainda pouco explorados no setor de transportes, especificamente em uma visão desagregada. À vista disso, há uma evidente necessidade de se ter maior aprofundamento e estudos.

A desagregação de inventários nacionais, incorporando os resultados a estruturas de MRV pode ainda estimular a regulamentação da precificação de carbono em ambientes regionais ou mesmo metropolitanos, carentes de métodos e dados consistentes. Além disso, poucos estudos estimam uma ampla variedade de GEE e poluentes atmosféricos, incluindo HFC resultante das emissões fugitivas do uso do ar-condicionado em veículos automotores.

1.5 Estrutura da pesquisa

Além desta introdução, que enfatiza o problema que motivou a pesquisa, os objetivos e o método de pesquisa, este estudo é composto por outros cinco capítulos. No Capítulo 2, os conceitos fundamentais utilizados pela literatura especializada são

apresentados. Tem-se uma revisão narrativa acerca dos pressupostos teórico-metodológicos sobre inventários de emissões, uso de energia e MRV. Busca-se identificar os principais modelos utilizados para estimar o uso de energia e emissões atmosféricas do setor de transportes, bem como as estruturas de MRV.

O Capítulo 3 expõe a revisão sistemática sobre métodos e protocolos que podem ser utilizados para desagregar espacialmente inventários nacionais em entidades subnacionais. Adicionalmente, verifica se os estudos consideram desagregação espacial de estruturas de MRV nacionais. Pretende-se verificar lacunas no conhecimento ou aperfeiçoar métodos existentes. O Capítulo 4 mostra o método desenvolvido, com base nas revisões conduzidas nos capítulos 2 e 3, para desagregar espacialmente inventários nacionais de uso de energia e emissões atmosféricas, adotando estruturas de MRV subnacionais.

Por conseguinte, o Capítulo 5 apresenta uma articulação teórico-prática sobre o tema por meio da aplicação de um experimento. Nesse contexto, modela-se o consumo energético e emissões de um país (Brasil) com base no maior nível de detalhes disponível para cada modo de transporte. Além disso, desagrega-se as saídas do modelo em estados, validando os resultados com inventários de emissões estaduais e com a intensidade energética do modo de transporte. Em seguida, aplica-se as estruturas de MRV para acompanhamento das medidas de mitigação brasileiras para o setor de transportes. Ao final, discorre-se sobre as conclusões e as implicações dos resultados da pesquisa, indicando as limitações e oportunidades de melhorias do estudo.

2. Base científica em inventários nacionais e estruturas de MRV: pressupostos teórico-metodológicos

As emissões de GEE aumentaram desde a era pré-industrial, impulsionadas em grande parte pelo crescimento econômico e populacional. Os efeitos das emissões atmosféricas, juntamente com outros impulsores antropogênicos, foram detectados em todo o sistema climático e são altamente prováveis de terem sido a causa dominante do aquecimento observado desde meados do século XX (IPCC, 2022). O programa de inventários nacionais do IPCC teve início em 1991, buscando desenvolver e refinar uma metodologia internacionalmente acordada para reportar as emissões nacionais líquidas de GEE. Até o momento, dois manuais foram publicados (IPCC, 1996, IPCC, 2006), além de guias de boas práticas e orientações adicionais (EGGLESTON, 2008).

Neste estudo, optou-se por seguir a estrutura proposta nas diretrizes do IPCC para as partes (Anexo I e não-Anexo I) da Convenção sobre Mudança do Clima (IPCC, 2006). É importante estruturar o inventário com base nas diretrizes do IPCC para reportar dados em uma metodologia comum e comparável com outros modelos, visto que este estudo pode apoiar outras pesquisas com diferentes características e ambições. Com base nesses pressupostos, este capítulo endereça os elementos-chave a ser considerados na condução de inventários nacionais e discorre sobre como as estruturas de MRV podem ser introduzidas, auxiliando o processo de monitoramento das metas de mitigação ou emissões totais.

2.1 Setores da economia

A modelagem do uso de energia e emissões atmosféricas não pode ser vista como um sistema isolado, ou seja, sem interações com outros setores da economia. Dessa forma, as emissões podem ser atribuídas a diversos setores, demandando uma comunicação entre modelos setoriais.

O IPCC recomenda a divisão das emissões diretas em quatro setores fundamentais: (1) Energia; (2) Processos Industriais e Uso de Produto (IPPU); (3) Agricultura, Floresta e Outros Usos do Solo (AFOLU) e (4) Resíduos (IPCC, 2006). Adicionalmente, cada setor possui divisões (subsetores) para um melhor detalhamento e alocação do consumo energético e das emissões. Por exemplo, Transportes é um subsetor

de Energia, contabilizando emissões a partir da combustão móvel, por exemplo, de veículos automotores rodoviários, locomotivas e aeronaves. Do mesmo modo, as emissões de combustões estacionárias a partir do subsetor de manufatura de produtos e materiais em indústrias também são alocadas ao setor Energia.

Para fins de comparação, mesmo ao inventariar apenas um setor ou subsetor, deve-se avaliar a não contabilização de parte do consumo energético e das emissões ocorridas em seu ambiente, visto serem, fundamentalmente, elementos de outros setores. Esse é o caso das emissões oriundas da geração de eletricidade consumida nos veículos elétricos do tipo BEV (*Battery electric vehicles*) e das emissões de CO₂ a partir do consumo de biocombustíveis em veículos equipados com motores de combustão interna (MCI).

2.2 Escopo das emissões

Além dos setores da economia, as emissões podem ser contabilizadas em diversos níveis, dependendo do escopo do inventário. No caso de inventários organizacionais que utilizam o conceito de análise de ciclo de vida (ACV), pode-se considerar três escopos: (1) Emissões diretas, referentes ao consumo energético; (2) Emissões indiretas¹¹, referentes à geração da energia consumida; e (3) Emissões indiretas, atividades geradas em escala pelo funcionamento regular da organização (LEE *et al.*, 2018, LENZEN, 2008).

A ACV pode ser usada para avaliar os potenciais impactos das emissões atmosféricas a partir da queima de combustíveis durante todo o seu ciclo de vida. Em outras palavras, a ACV considera o ciclo *well-to-wheels*, ou seja, cobre as emissões ocorridas nas fases de produção e distribuição dos combustíveis (*well-to-tanks*), bem como do consumo de combustível nas fontes móveis (*tank-to-wheels*).

Em inventários multissetoriais, os escopos 2 e 3 e, conseqüentemente, a ACV, perdem a aplicabilidade, uma vez que já são contabilizados em setores correlatos. Dessa forma, modelar somente as emissões diretas oriundas do uso final das fontes energéticas, por exemplo, gasolina e diesel para veículos e geradores, é uma boa prática a ser adotada em inventários multissetoriais (LARSEN; HERTWICH, 2009).

Caso o país consuma biocombustíveis em sua matriz energética, deve-se atentar para as emissões indiretas. Apesar da absorção de CO₂ na atmosfera durante a fase de

¹¹ Emissões que são consequência das atividades da entidade que reporta, mas ocorrem em fontes pertencentes ou controladas por outra entidade (WBCSD e WRI, 2004).

crescimento da matéria prima, pode-se ocorrer emissões de Óxido Nitroso (N₂O) a partir do uso intensivo de fertilizantes (MELILLO *et al.*, 2009). Então, essas emissões tendem a ser contabilizadas no setor AFOLU. Por essas razões, as emissões de CO₂ no setor de transportes provenientes do uso da biomassa como combustível não devem ser contabilizadas (BRASIL, 2020).

2.2.1 Classificação dos gases de efeito estufa

Para reduzir as emissões de carbono e manter o aquecimento global restrito a 2°C acima dos níveis pré-industriais, preferencialmente abaixo de 1,5°C, foram desenvolvidos diversos cenários, denominados RCP (*Representative Concentration Pathways*). Dentre os elementos considerados para estimar os RCP, como a forçante radiativa¹² na atmosfera, a concentração de GEE e informações de tipo de cobertura terrestre, destacam-se as emissões de GEE diretos e indiretos (NOBRE; MARENGO, 2017; ALLEN *et al.*, 2014).

A classificação dos GEE em diretos e indiretos abrange diversos gases com potencial de influenciar a energia solar absorvida no sistema climático. Os principais GEE diretos e indiretos são expostos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Principais GEE diretos e indiretos

Diretos	Indiretos
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Monóxido de Carbono (CO)
Metano (CH ₄)	Óxidos de Nitrogênio (NO _x)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	Compostos Orgânicos Voláteis Não Metano (NMVOC)
Hidrofluorcarbonetos (HFC)	
Ozônio (O ₃)	
Perfluorcarbonetos (PFC)	Hidrogênio (H ₂)
Enxofre Hexafluoride (SF ₆)	
Trifluoreto de Nitrogênio (NF ₃)	
Pentafluoreto de Sulfureto de Trifluorometil (SF ₅ CF ₃)	Dióxido de Enxofre (SO ₂)
Éteres e Éteres Halogenados (p.ex. HG-10 e HG-01)	

Fonte: autor.

Os gases CO e NO_x têm efeitos indiretos importantes sobre o aquecimento global, pois reagem com os radicais hidroxila (OH) na atmosfera, reduzindo sua abundância.

¹² ‘Diferença em irradiância líquida na tropopausa, entre um estado de referência e um estado perturbado devido ao agente climático’ (PBMC, 2004, p.239)

Como os radicais OH presentes na atmosfera atuam na redução do tempo de vida de GEE como o CH₄, o CO e NO_x, a redução de concentração aumenta indiretamente o potencial de aquecimento global.

A presença de CO, NO_x e NMVOC¹³ na atmosfera também pode levar à formação do GEE O₃ na troposfera. Por sua vez, o SO₂, quando ligado ao carbono, forma aerossóis, todavia, há contestações sobre sua relação com o aquecimento global¹⁴. Por essas razões, além de serem considerados poluentes atmosféricos de ação local (por exemplo, em bairros e cidades), alguns GEE indiretos têm potencial para aumentar a temperatura média do planeta (ação global), manifestando um duplo efeito nocivo.

Uma classificação mais recente reside nos GEE e em alguns poluentes atmosféricos que possuem um tempo de vida na atmosfera muito inferior ao CO₂, mas com grande potencial de aquecimento global, denominados Poluentes Climáticos de Curta Duração (*Short-Lived Climate Pollutants* – SLCP). Os principais SLCP são os gases CH₄, O₃ e HFC, além do *Black Carbon*¹⁵. Esses gases e material particulado atualmente representam entre 40% e 45% do aquecimento global (ARIF *et al.*, 2020). Devido ao alto impacto globalmente e localmente, a mensuração, relato e verificação dos SLCP ou, pelo menos, parte deles, é estratégica para o atingimento de compromissos ambientais e redução do impacto na saúde da população local, sobretudo urbana.

Este trabalho segue a contabilização adotada para o setor Energia da 3^a e da 4^a Comunicação Nacional do Brasil à UNFCCC (BRASIL, 2016; 2020). Especificamente, considera-se o subsetor Queima de Combustíveis Fósseis, contabilizando as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, para GEE diretos, e de CO, NO_x e NMVOC, para GEE indiretos. O Brasil adota a comunicação dessa lista de GEE baseada na decisão 17/CP.8 (UNFCCC, 2003). Além do historicamente reportado, este trabalho avança ao inventariar e desagregar os gases HFC 134a, SO₂, RCHO, além de MP₁₀ e de emissões evaporativas.

¹³ Ou VOC, se considerar o CH₄.

¹⁴ Os aerossóis podem contribuir tanto para o resfriamento quanto para o aquecimento do planeta. Isso ocorre, pois tais compostos refletem a radiação do sol, enviando-a de volta ao espaço e resfriando o planeta, mas também aumentam a vida útil e a espessura das nuvens, levando ao aumento da radiação e do aquecimento. Portanto, ainda não há um consenso sobre se os aerossóis têm um efeito de aquecimento ou resfriamento no planeta.

¹⁵ Material particulado (MP_{2,5}) formado a partir da combustão incompleta de combustíveis fósseis ou de biomassa.

2.2.2 Potencial de aquecimento global

O Potencial de Aquecimento Global (GWP) e o Potencial de Mudança de Temperatura Global (GTP) são métricas que podem ser adotadas para quantificar e reportar as contribuições relativas e absolutas à mudança climática, considerando diferentes gases e regiões (MYHRE *et al.*, 2013). O GWP foi desenvolvido para permitir comparações dos impactos do aquecimento global de diferentes gases, sendo uma medida da quantidade de energia que a emissão de 1t de um respectivo gás irá absorver ao longo de um determinado período em relação à emissão de 1t de CO₂. Quanto maior o valor de GWP, mais um determinado gás aquece o planeta comparado ao CO₂ durante esse período (usualmente de 100 anos) (EPA, 2022).

O GTP é a razão da mudança na temperatura média global da superfície em um ponto escolhido no tempo, de um dado gás de interesse, em relação ao CO₂ (MYHRE *et al.*, 2013). Em outras palavras, o GTP é uma métrica baseada na mudança de temperatura, correlacionada à mudança na temperatura média da superfície global (BRASIL, 2016).

Existem incertezas significativas relacionadas ao GWP e ao GTP, no entanto as incertezas relativas ao GTP são maiores. Pode-se considerar que ambos dependem da meta a ser alcançada. O GTP é indicado para metas de limite de temperatura, por exemplo, manter o aumento da temperatura média global em até 1,5°C, enquanto o GWP se adequa a avaliações de quantidade de GEE emitida em um horizonte de tempo (MYHRE *et al.*, 2013).

As métricas GWP e GTP são revisadas periodicamente por meio dos ARs (*Assessment Report*), conduzidos e publicados pelo IPCC. A Tabela 2.2 indica os principais valores considerados em comunicações nacionais e estudos de referência. Apesar da existência de uma maior quantidade de GEE diretos (como exposto na Tabela 2.1) e com GWP maiores, o montante emitido é irrelevante em comparação com o três principais GEE diretos especialmente no setor de transportes.

Tabela 2.2. Principais GEE diretos e indiretos

GEE direto	GWP-100				GTP-100
	AR2	AR4	AR5	AR6	AR5
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1	1	1	1	1
Metano (CH ₄)	21	25	28	29,8/27,2*	4
Óxido Nitroso (N ₂ O)	310	298	265	273	234

Nota (*). O AR6 diferencia a origem fóssil e não-fóssil do gás CH₄.

Fonte: IPCC (1996); IPCC (2014); e IPCC (2021).

O horizonte de tempo, por exemplo, 100 anos, é importante ser considerado, visto que o GWP de uma substância depende do período em que o potencial é calculado. O tempo de vida dos GEE na atmosfera variam e, conseqüentemente, o seu potencial de aquecimento. Portanto, considerar o mesmo horizonte-base ajuda a comparar e converter gases utilizando uma métrica comum. Como os resultados são baseados em fatores como a eficiência radiativa e a taxa de decaimento¹⁶ de cada gás em relação ao CO₂, reforça-se a necessidade de revisões periódicas por meio de ARs.

2.3 Níveis de detalhamento das estimativas

Os cálculos das emissões diretas por combustão móvel são estruturados conforme a disponibilidade de dados sobre fonte energética, fatores de emissão (FE) e atividade. Nessa linha, a definição dos *tiers*¹⁷ a serem considerados no modelo é um dos pilares na condução de um inventário nacional. Os *tiers* estão diretamente relacionados com as abordagens de cálculo *top-down* e *bottom-up*. Fundamentalmente, os *tiers* variam em função da utilização de dados agregados de consumo energético do setor ou da estimativa desagregada da energia consumida por meio da contabilização das diversas unidades de combustão móvel.

2.3.1 *Tiers: abordagens a partir de fatores de emissão*

Um FE é utilizado como ferramenta para quantificar a emissão de um determinado poluente por um veículo individual ou uma frota de veículos. Nessa estimativa, são consideradas relações funcionais que predizem a quantidade emitida de um gás ou poluente por distância percorrida (por exemplo, g/km) ou energia consumida (por exemplo, kg/l) (GRIGORATOS e MARTINI, 2014). Os FE são tipicamente derivados de categorias de veículos e dependem de parâmetros como porte do veículo, as tecnologias de controle de emissão, a composição e a qualidade do combustível utilizado, além de condições ambientais e operacionais (FRANCO *et al.*, 2013).

¹⁶ A quantidade removida da atmosfera em um determinado número de anos.

¹⁷ Nível de detalhamento das estimativas.

A existência de FE locais, detalhados por fonte energética e tecnologia, não implica, necessariamente, no uso de cálculos ou abordagens de emissões de GEE mais detalhadas. Isso decorre da necessidade de se obter concomitantemente os dados desagregados de frota em circulação, rendimento energético por categoria de veículo e atividade (por exemplo, intensidade de uso, lotação e ocupação média dos veículos), para o transporte rodoviário, e tipos de motores de embarcações, locomotivas e aeronaves (ciclo LTO e cruzeiro) para os outros modos de transporte. Além disso, é necessário o uso ou desenvolvimento de um modelo robusto, cujas saídas devam ser, preferencialmente, analisadas e ratificadas por especialistas.

O cálculo detalhado das emissões no transporte exige não apenas a natureza das viagens e distâncias percorridas, mas o consumo energético dos veículos, que por sua vez depende de dados sobre lotação e ocupação média (BUENO *et al.*, 2012). A escolha da abordagem mais indicada à realidade do país demanda um fluxo lógico de questionamentos. Para compatibilizar realidades distintas em um padrão global de cálculo de emissões, o IPCC (2006) ressalta três abordagens fundamentais, condizentes com variantes de disponibilidade de dados locais:

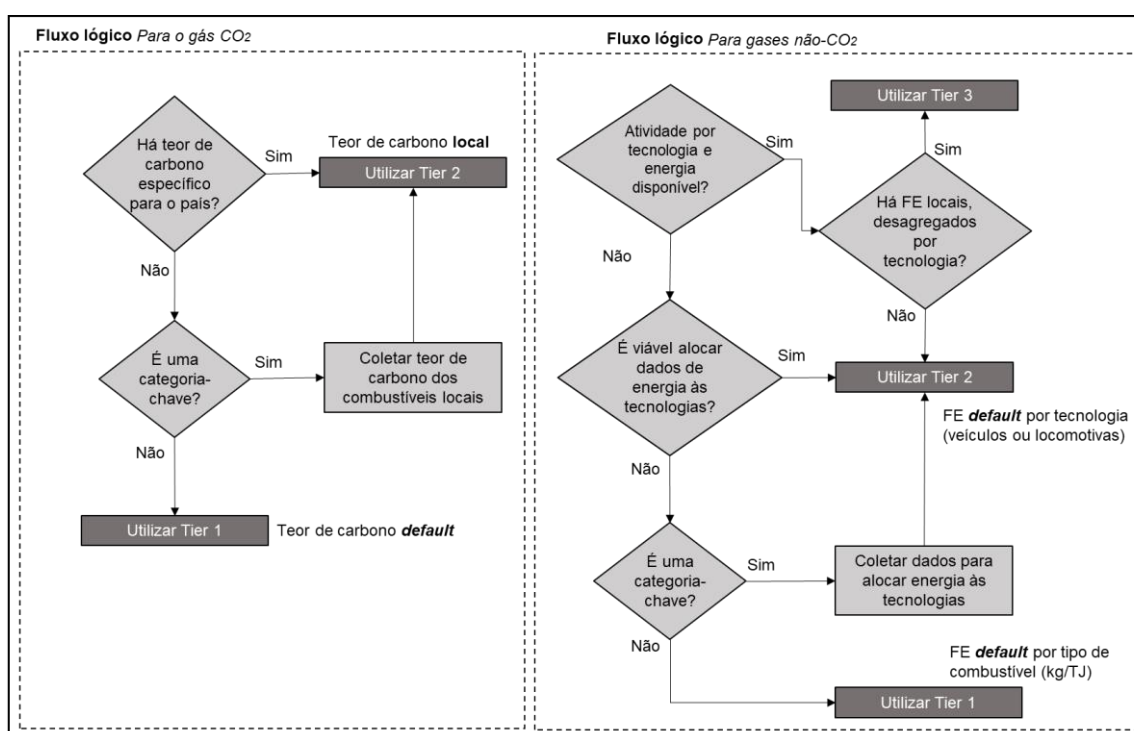
1. *Tier 1*: para a utilização de FE *default* fornecidos pelo IPCC (para os gases CO₂ e não-CO₂);
2. *Tier 2*: (i) utiliza FE com teor de carbono local (para o gás CO₂); ou (ii) utiliza FE *default* fornecidos pelo IPCC, mas desagrega as emissões por tecnologia e fonte energética (gases não-CO₂); e
3. *Tier 3*: considera FE locais e desagrega as emissões por tecnologia e fonte energética (gases não-CO₂).

A estimativa de um FE para o gás CO₂ considera o conteúdo de carbono do combustível em análise. Isso significa que a estimativa das emissões de CO₂, convencionalmente, é conduzida diretamente em função da energia consumida. Os esforços dos países se concentram, portanto, na especificação do teor de carbono e no melhoramento da coleta de dados sobre o combustível vendido localmente.

No caso de gases não-CO₂, as estimativas tendem a apresentar maior incerteza, pois os seus FE dependem da tecnologia, combustível consumido e características operacionais dos veículos (intensidade de uso, regime de operação etc.). Isso requer atividades intensivas de tratamento e análise de consistência dos dados. Nesse caso, a utilização das abordagens *tiers 2* e *3* apresentam ganhos significativos em acurácia em

comparação com uma abordagem *tier 1* (KIM *et al.*, 2017), sobretudo se for uma categoria-chave¹⁸.

No Brasil, até o momento, as estimativas de uso de energia e emissões *tier 3* são conduzidas apenas nos transportes aéreo e rodoviário (BRASIL, 2011, BRASIL, 2014; BRASIL, 2016, ANAC, 2020, BRASIL, 2020), em decorrência da pouca disponibilidade de dados locais de FE e atividade desagregados a nível de tecnologia para os outros modos de transporte. Como resumo, a Figura 1.1 ilustra o fluxo lógico de decisões quanto a adoção de cada abordagem, considerando os gases CO₂ e não-CO₂ para o transporte rodoviário e ferroviário, metodologicamente semelhantes.



Fonte: IPCC (2006).

Figura 2.1. Árvore de decisão para escolha dos *tiers* no transporte rodoviário e ferroviário

No caso do modo aquático, é necessário diferenciar as emissões entre o transporte doméstico e internacional. Nesse caso, o estudo IPCC (2006) classifica as abordagens apenas entre *tier 1* e *tier 2*, sendo a segunda baseada em FE de CO₂ com conteúdo de carbono local e FEs não-CO₂ baseados no consumo de combustível, mas apenas por tipo de motor. Assim, não há abordagem denominada *tier 3* para esse modo de transporte.

¹⁸ Em termos da sua contribuição para o nível absoluto das emissões e remoções nacionais (HEROLD *et al.*, 2006).

Por sua vez, o transporte aéreo também deve diferenciar as emissões entre o transporte doméstico e internacional. Os níveis são escalonados conforme o consumo energético por: (i) combustível (*tier* 1); (ii) fase de operação e por tipo de aeronave (*tier* 2); (iii) par origem-destino, fase de operação e tipo de aeronave (*tier* 3A); (iv) movimentos de voo completos, variantes de aeronaves e de motores (*tier* 3B). Com base na dificuldade de coleta de um histórico de dados de movimentações completas, os países convencionalmente adotam abordagens de aviação até a *tier* 3A.

Salienta-se que as diretrizes do IPCC para escolha dos *tiers* enfatizam os países, não sendo aplicáveis em entidades subnacionais. Para que isso ocorra, o Capítulo 3 discorre sobre como a literatura especializada tem abordado desagregações de inventários nacionais.

2.3.2 Top-down, bottom-up e ASIF: Abordagens de referência e setorial

Usualmente, a condução de inventários nacionais de uso de energia e emissões tem como atividades iniciais a caracterização do setor e a coleta de dados primários e secundários (GONÇALVES *et al.*, 2019b). O primeiro resultado dessas atividades é a definição do *tier* que será considerado para cada modo de transporte. Para isso, sugere-se os fluxos lógicos ilustrados na Figura 2.1, referentes aos gases CO₂ e não-CO₂.

Com base na identificação dos FE e de dados de atividade, pode-se determinar a utilização de um *tier* mais ou menos detalhado. A próxima atividade, estritamente dependente da identificação do *tier*, envolve a definição da abordagem de cálculo das emissões atmosféricas.

As diretrizes de divulgação da UNFCCC exigem que os países utilizem uma abordagem de referência, compreendida como uma abordagem *top-down*, para estimar as emissões de CO₂ a partir da combustão de combustíveis fósseis, e uma metodologia setorial, compreendida como uma abordagem *bottom-up*, visando estimar as emissões a partir das diversas fontes emissoras (TREATON *et al.*, 2006, EPA, 2022). As duas abordagens podem ser descritas como:

1. De referência: as emissões são estimadas a partir do consumo energético observado do modo de transporte (ou do setor); e
2. Setorial: as emissões são estimadas a partir da contabilização do consumo energético de todas as fontes móveis do modo de transporte/setor.

A abordagem de referência considera dados de fornecimento de energia de um país e não possui informações detalhadas sobre como os combustíveis individuais são consumidos em cada setor (TREATON *et al.*, 2006). É oportuno salientar que o IPCC recomenda o uso do consumo energético observado como valor de referência para ambas as abordagens (IPCC, 2006). No caso da setorial, o consumo observado é utilizado como referência para o ajuste das estimativas desagregadas. Altera-se, portanto, o valor do consumo energético estimado, igualando-o ao observado (BRASIL, 2016).

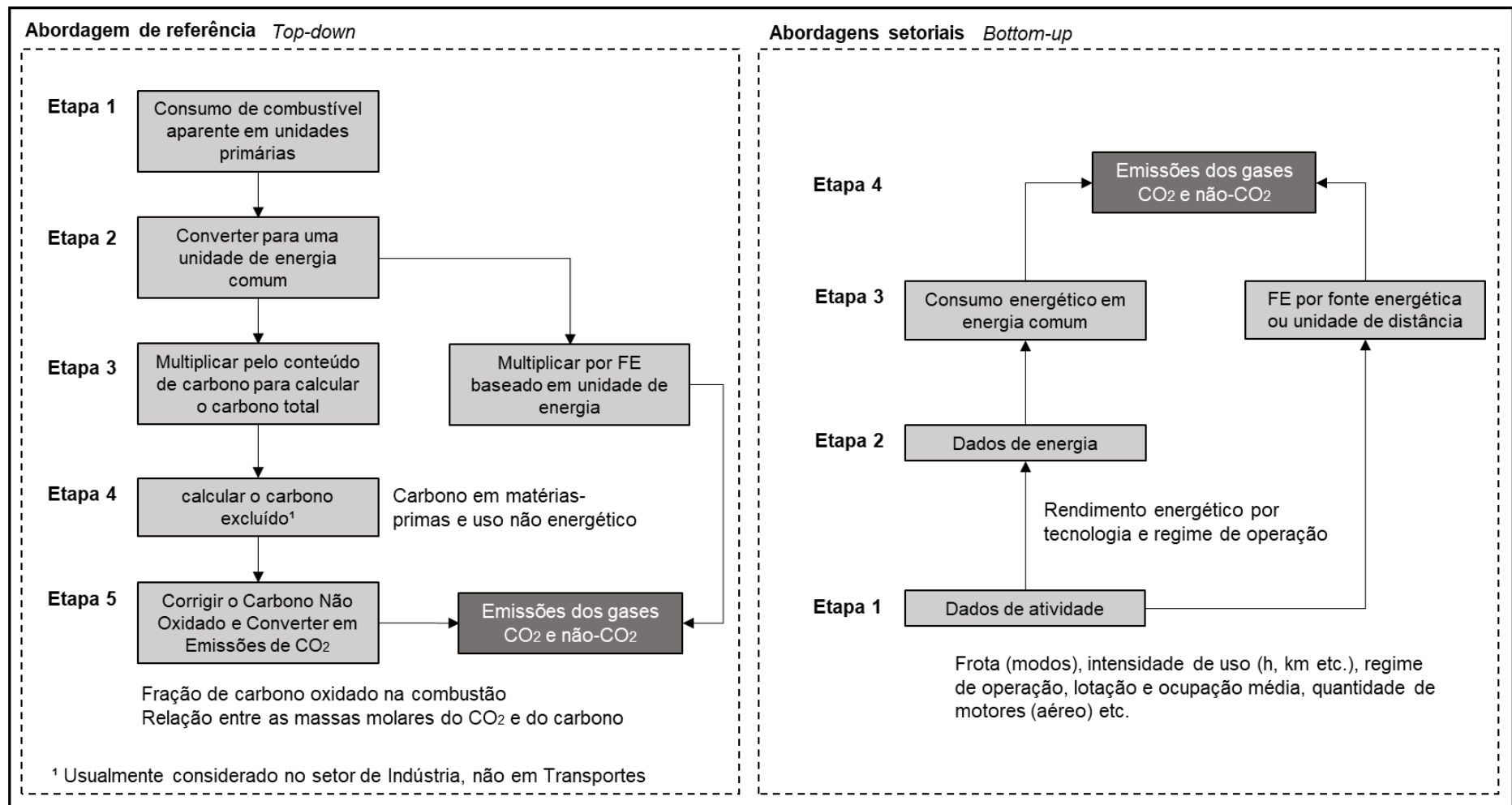
Gonçalves *et al.* (2019a) sugerem que esse processo de ajuste seja realizado a partir de dados de atividade, ou seja, não no consumo energético estimado, verificando se a intensidade energética¹⁹ se mantém condizente com a esperada para o tipo de atividade ou modo de transporte. No setor de transportes, a abordagem de referência é convencionalmente utilizada em estimativas de emissões *tier 1* a partir da queima de energia informada nas edições periódicas do BEN. Na outra vertente, utiliza-se a abordagem setorial em estimativas de emissões *tiers 2* e *3* a partir da contabilização das tecnologias.

Ambas as abordagens podem ser empregadas em estimativas *tier 2*. No caso da abordagem de referência, uma estimativa é considerada *tier 2* se o FE for baseado no teor de carbono local, para o gás CO₂, e o cálculo for conduzido a partir de dados agregados de energia. Do mesmo modo, para gases não-CO₂, se o cálculo utilizar um FE *default* e for conduzido por uma abordagem setorial, também deverá ser considerado como uma estimativa *tier 2*.

As estimativas que são conceitualmente restritas a abordagens específicas são a *tier 1*, para a de referência, e *tier 3*, para a setorial. No caso da *tier 1*, não se justificaria o esforço em utilizar a abordagem setorial para aplicar um FE *default* do gás CO₂ sobre o consumo estimado de um combustível, dado que isso poderia ser conduzido diretamente sobre o consumo energético observado com maior confiabilidade. Além disso, é uma boa prática estimar paralelamente as emissões pelas abordagens setorial e de referência para conferência e ajuste dos resultados (IPCC, 2006). No caso da estimativa *tier 3*, justifica-se pela impossibilidade de se calcular as emissões desagregadas por tecnologia, FE locais e atividade, utilizando a abordagem de referência.

¹⁹ KJ/p-km ou KJ/t-km.

A Figura 1.12 mostra as atividades fundamentais das abordagens de referência e setoriais expostas pela UNFCCC. No caso das abordagens setoriais, trata-se de uma simplificação, em virtude da alta especificidade de cada setor. Inventários nacionais que apliquem o conjunto de abordagens mais detalhadas, ou seja, *tier 3*, setorial e referência, permitem estratificar uma série de informações de energia, emissões e atividade. No transporte rodoviário, é possível produzir informações sobre atividade, como a quantidade de veículos por categoria, a idade média e taxa de motorização. Ademais, tem-se o perfil de uso de energia e emissões por tecnologia, podendo traçar cenários considerando diferentes compromissos assumidos e ambições políticas.



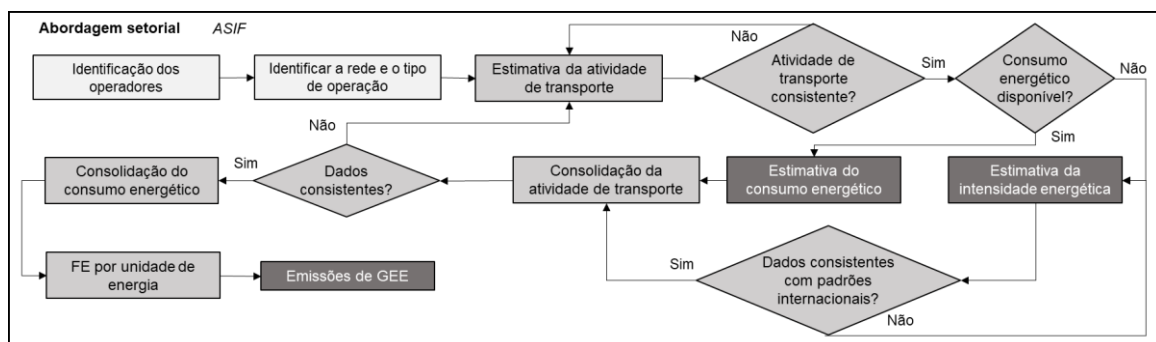
Fonte: Waldron *et al.* (2006); e Treanton *et al.* (2006).
 Figura 2.2. Abordagens de referência e setoriais da UNFCCC simplificadas

Aprofundando a temática, Cuenot (2012), Jain (2017) e Gonçalves *et al.*, (2019b) exploram as emissões atmosféricas pelo método *Activity–Structure–Intensity–Fuel* (ASIF). Proposto por Shipper *et al.* (2000), o método emprega variáveis de atividade, energia e emissões em uma equação geral para o cálculo das emissões de transportes.

Mendiluce e Shipper (2011) assumem que os dados do IPCC de intensidade de carbono podem ser utilizados como referência. Conceitualmente, o método ASIF se aproximaria da abordagem setorial do IPCC. Trata-se de um método que contém elementos de atividade típicos de uma abordagem *bottom-up*, mas que não necessariamente parte da contabilização de todas as fontes móveis existentes no modo de transporte, como na abordagem de referência.

Nessa circunstância, a aplicação depende da disponibilidade de dados de cada modo de transporte, contabilizando as emissões a partir de dados agregados ou desagregados. Essa assimilação é visível no estudo de Gonçalves *et al.* (2019b) ao modelarem as emissões atmosféricas do transporte ferroviário. Os autores propõem a utilização de dados locais de intensidade energética e atividade, contabilizando-as de cada concessionária que opera nas ferrovias, em conjunto com dados de intensidade de carbono *default* do modo. Tem-se, dessa forma, uma estimativa fundamentalmente *bottom-up*, mas que não parte da contabilização das fontes móveis (Figura 2.3).

Considera-se neste estudo que a abordagem setorial, quando considerar a intensidade energética de linhas ou operadoras para cálculo das emissões de GE, utiliza o método ASIF. Do mesmo modo, quando considerar a contabilização das fontes móveis, utiliza uma abordagem *bottom-up*.



Fonte: Gonçalves *et al.*, 2019b)
 Figura 2.3. Abordagens setorial ASIF

2.4 Estruturas de MRV e inventários de emissões

MRV é um termo abrangente que descreve o processo de medição e coleta de dados sobre emissões atmosféricas ou medidas de mitigação, compilando e relatando essas informações a terceiros para revisão e verificação. O Acordo de Paris, mediado em dezembro de 2015, estabeleceu disposições universais e harmonizadas para estruturas de MRV (SINGH *et al.*, 2016). Apesar de as partes da UNFCCC tiverem sido orientadas a desenvolverem um sistema MRV, o Acordo de Paris enfatizou a sua importância (SARR, 2018). Anteriormente, o conceito de MRV era mencionado no contexto das NAMAs, sobretudo para avaliar caminhos de desenvolvimento sustentável em países emergentes (SHARMA; DESGAN, 2013).

A discussão em torno de estruturas de MRV se baseia no escopo do processo e na quantidade de informações necessárias para verificar se uma entidade está no caminho de desenvolvimento estabelecido em compromissos governamentais ou em cenários distintos. Em nível nacional, o nível de detalhamento das estimativas depende da quantidade e consistência dos disponíveis. Assim, a coleta de dados preliminares e a determinação do nível de detalhamento da abordagem de cálculo são atividades que precedem a delimitação do escopo e da abrangência de uma estrutura de MRV.

Para Vieweg (2017), do mesmo modo que as fronteiras para inventários nacionais são claramente definidas nas Diretrizes do IPCC, as fronteiras das estruturas de MRV precisam ser delimitadas com base na sua natureza, no objetivo da análise e na disponibilidade de dados. Segundo Ellis e Moarif (2015), a transparência e a integridade dos relatórios sob a estrutura da UNFCCC são melhores quando:

- As diretrizes sobre o que medir e relatar são claras;
- Há maturidade metodológica para a condução dos inventários; e
- Há necessidade de explicitar atividades metodológicas não realizadas²⁰.

O atual regime de MRV dos países para compromissos climáticos não obriga o relato de todas as informações necessárias para entender as metas e avaliar se os países as estão atingindo. Isso pode ser observado em comunicações de financiamento climático mobilizados por países desenvolvidos e nas metas de mitigação de países não-Anexo I, que inclui o Brasil. Melhorar requisitos das comunicações nacionais poderia resolver

²⁰ Informando, por exemplo, recomendações para melhorias publicamente disponíveis.

algumas dessas deficiências. No entanto, o preenchimento de outras lacunas exigirá melhorias metodológicas de coleta de dados e de MRV (ELLIS e MOARIF, 2015).

Não obstante, Sarr (2018) advoga que as estruturas de MRV devem ser estabelecidas dentro de limites semelhantes aos estabelecidos nas NDC dos países, com referência aos setores da economia. Isso significa que as abordagens para as estruturas de MRV podem ser as mesmas de referência e setoriais utilizadas em inventários nacionais. O que pode validar e retroalimentar os resultados dessas estimativas.

Na visão de Goes *et al.*, (2020a), o uso de dados do inventário nacional em estruturas de MRV, especialmente em abordagens *bottom-up*, amplia a consistência dos resultados do inventário ao mesmo tempo que aumenta a comparabilidade entre as estruturas de MRV no mundo. Em síntese, utilizar a mesma estrutura de dados e definições pode contribuir para o desenvolvimento de um sistema nacional de coleta de dados e de relatórios técnicos consistente.

Na outra vertente, os dados compilados a partir de estruturas de MRV podem ser usados para o inventário nacional, seja como dados de entrada ou para fins de revisão (BUENO e BARTRINA, 2017). Se coordenados entre diferentes regiões geográficas, os dados coletados para estruturas de MRV podem fornecer uma amostra representativa que possibilita inferir valores nacionais ou realizar análises de consistência dos resultados de balanços energéticos nacionais, melhorando a precisão das estimativas.

Para delinear as fronteiras das estruturas de MRV, a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) divide os escopos das estruturas de MRV em: (1) Emissões; (2) Ações de mitigação; e (3) Suporte (SINGH *et al.*, 2016). A Figura 2.3 sintetiza a abrangência de cada escopo.



Fonte: Singh *et al.* (2016).

Figura 2.4. Escopo de estruturas de MRV

O escopo Emissões busca mensurar, reportar e verificar as emissões de GEE a nível nacional, organizacional e de instalações específicas. Entende-se os esforços para suprir esse escopo se concentram em identificar e detalhar os indicadores que melhor representam o perfil de emissões do país.

O escopo Ações de mitigação mensura e reporta as medidas de mitigação e seus impactos no padrão de desenvolvimento de cada país. Observa-se que o foco está em identificar os indicadores que melhor representam o modelo de desenvolvimento vigente no país a partir das medidas de mitigação comprometidas e nas metas assumidas. No caso do escopo Suporte, mensura-se o andamento do suporte fornecido e recebido pelos países-membro da UNFCCC. Os indicadores buscam dimensionar o andamento dos suportes comprometidos e os seus impactos nas mitigações almejadas pelos países recebedores.

Nessa linha, Vieweg (2017) mensura indicadores de MRV com base na modelagem das emissões atmosféricas pelo Método ASIF. Para o autor, assim como na condução de inventários nacionais, a principal questão que determina as necessidades de dados é o nível de desagregação dos parâmetros. Para a análise de mitigação, o tipo de medida de mitigação, os efeitos pretendidos, as necessidades de informação dos tomadores de decisão e os requisitos externos determinarão os parâmetros relevantes.

Até o momento, nota-se que as estruturas de MRV são requeridas tanto para avaliar resultados de projeções de metas e medidas de mitigação como para avaliar o histórico/linha de base, reportando o comprometimento e a ambição do país. Para Clapp e Prag (2012), linha de base de emissões indica um nível de emissões de referência que poderia ser usado para estabelecer uma meta ou medir mudanças nas emissões atmosféricas ao longo do tempo.

Assim como a linha de base pode ser aplicada na condução inventários de emissões convencionais, reportando as emissões históricas até um ano-base, a sua estimativa também é adotada para projeção de cenários. Neste caso, a linha de base pode fornecer dados para estabelecer trajetórias de crescimento de diversas variáveis, como desdobramento de tecnologias, uso de energia, distribuição espacial e intensidade das atividades etc. Não obstante, abordagens *top-down* baseadas no consumo energético não apresentam o nível de detalhes requerido para estruturas de MRV, particularmente para a linha de base Vieweg (2017).

2.5 Considerações do Capítulo 2

Este capítulo endereçou os elementos-chave a ser considerados na condução de inventários nacionais, bem como a inserção de estruturas de MRV no estabelecimento de metas de mitigação e acompanhamento das emissões totais. Para as estimativas nacionais, este estudo segue as diretrizes do IPCC a partir do nível de detalhamento dos dados disponíveis nos países. Na outra vertente, as estruturas de MRV seguem o escopo da OCDE e autores como Vieweg (2017) e Ellis e Moarif (2015). Todas as abordagens para estimar emissões atmosféricas partem do consumo energético, que pode ser identificado em balanços energéticos nacionais do setor de energia ou calculados a partir de dados nacionais de atividade e fontes energéticas consumidas em um setor.

Observa-se que os conceitos *top-down* e *bottom-up* são amplamente utilizados em outras esferas do conhecimento, seja no marketing ou na adaptação de cidades (SHANI e CHALASANI, 1992, DESSAI e HULME, 2014). Para a condução de inventários de emissões, esses conceitos podem ser traduzidos em *tiers*, cuja aplicabilidade depende da utilização de FE locais ou *default*.

Em um prognóstico preliminar, entende-se que mensurar as emissões atmosféricas e uso de energia pelas abordagens mais detalhadas, como *tier 2*, para CO₂, e *tier 3*, para gases não-CO₂, fornece mais subsídios para desagregar espacialmente inventários nacionais, possibilitando estimar indicadores de MRV por entidade subnacional. Isso se justifica pelo maior esforço nas atividades de coleta e tratamento de dados, produzindo uma quantidade maior de variáveis de saída do modelo.

Por analogia, dado que uma abordagem *tier 1* se apoia na venda de um determinado combustível no país e no seu FE *default*, geralmente em kg/TJ, a quantidade de informações necessária para estimar as emissões é reduzida, assim como as possibilidades de desagregação. No entanto, esses pressupostos demandam uma investigação na literatura sobre como os atores envolvidos na modelagem de emissões atmosféricas e uso de energia estão tratando a desagregação de inventários e/ou estruturas de MRV nacionais em entidades subnacionais. O Capítulo 3 conduz essa investigação na literatura a partir de uma revisão sistemática da literatura.

3. Protocolos para desagregação espacial de inventários nacionais

Neste capítulo, os métodos existentes de desagregação espacial de inventários de uso de energia e emissões em entidades subnacionais são investigados. Adicionalmente, busca-se identificar estudos que associam a desagregação espacial de inventários nacionais com estruturas de MRV. Diferentemente dos procedimentos de pesquisa adotados no Capítulo 2, esta seção conduz uma revisão bibliográfica sistemática, com foco em artigos científicos, e uma documental, com foco em relatos oficiais de países, dado que se pretende identificar, sintetizar e analisar uma ampla gama de trabalhos. Assim, dá-se ênfase à síntese das características e potenciais aplicações dos métodos identificados, em detrimento do resgate da evolução histórica das discussões que culminaram nos métodos atuais, característica frequente em revisões narrativas (MINAYO e SANCHES, 1993).

A literatura sobre desagregação de inventários é escassa e usualmente associada a análises de decomposição (CAO *et al.*, 2019, CHEN *et al.*, 2019). O objetivo dessas análises em inventários, convencionalmente, se baseia na identificação das forças direcionadoras²¹ que afetam o padrão de emissões do país (SREEKANTH, 2016, LIU *et al.*, 2017). Forças direcionadoras são variáveis que geram impactos nas emissões e ajudam a explicar o histórico e projetar o futuro (CHEN *et al.*, 2019). Reconhecendo a importância da identificação de forças direcionadoras das emissões nos países, pondera-se que, no escopo deste estudo, essa atividade compõe uma etapa metodológica de um processo mais amplo. Especificamente, pode-se utilizar tais variáveis como *proxy* para alocação do consumo energético nacional em entidades subnacionais.

3.1 Pesquisas sistemática e documental

O procedimento da revisão sistemática da literatura considera a adaptação de duas abordagens concomitantemente: revisão sistemática convencional e *Snowballing* (bola de neve). A Figura 3.1 ilustra o fluxo lógico de iterações da revisão sistemática. Para a condução da revisão sistemática convencional, segue-se as diretrizes de Kitchenham *et al.* (2009), que desenvolveram uma estrutura de revisão adaptada para refletir os

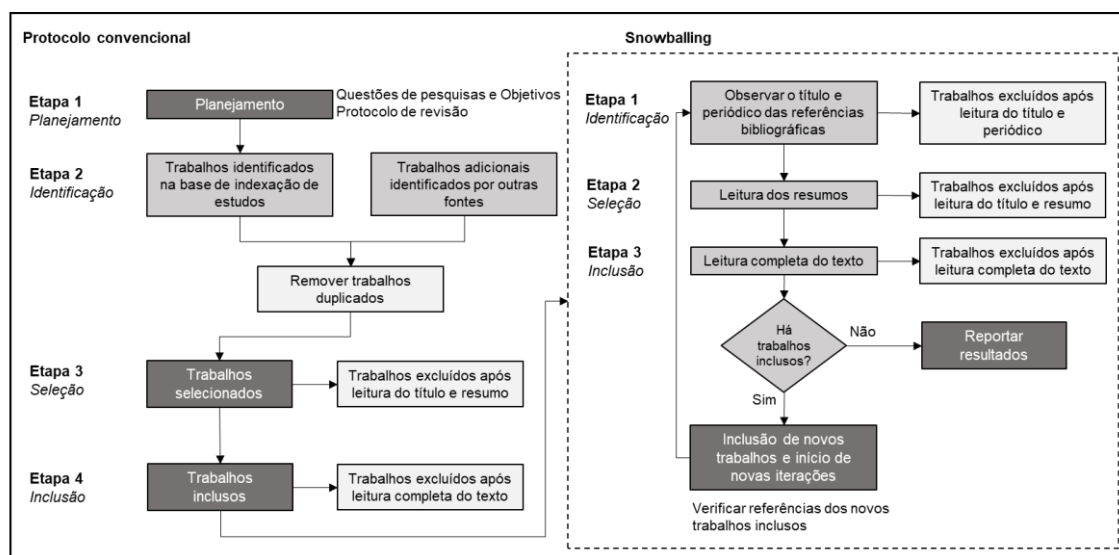
²¹ Dos termos: *driving forces* e *driving factors*.

problemas específicos da pesquisa de engenharia. O procedimento é composto pelas atividades de: (1) Planejamento; (2) Identificação; (3) Seleção; e (4) Inclusão.

A atividade de planejamento define os objetivos da revisão, bem como os critérios adotados para a identificação dos artigos, seleção e inclusão. Na atividade de identificação, tem-se a busca inicial dos artigos na base de dados ou de indexação considerada, considerando as palavras-chave e requisitos de busca (*strings*).

As atividades de seleção e inclusão são responsáveis pelo refinamento da busca, por meio da leitura parcial e completa dos artigos. O intuito é que, efetivamente, obtenha-se os artigos relevantes ao objetivo da revisão, considerando uma busca abrangente. Como resultado preliminar, tem-se a relação dos artigos inclusos, ou seja, que foram lidos por completo e estão de acordo com os objetivos da revisão. Após isso, inicia-se novas iterações utilizando o método *Snowballing* (WOHLIN, 2014). O intuito desse método é identificar, a partir das referências bibliográficas contidas nos artigos inclusos, artigos relevantes aos objetivos da revisão que não foram identificados em rodadas anteriores.

O resultado é um procedimento de revisão sistemática que minimiza a possibilidade da não consideração de um estudo relevante, bem como a existência de um viés de pesquisa. Dada a pouca literatura existente no tema, justifica-se a utilização de dois procedimentos de revisão sistemática em sequência.



Fonte: Kitchenham *et al.* (2009) e Wohlin, C. (2014).

Figura 3.1. Procedimento desenvolvido para a condução da revisão sistemática

O objetivo da revisão sistemática é sintetizar e analisar os estudos que desagregam espacialmente inventários de emissões atmosféricas do setor de transportes.

Especificamente, busca-se avaliar quais e como as variantes de atividade, método e GEE foram modeladas. A fim de assegurar a identificação de uma maior diversidade de artigos, escolheu-se a base de indexação *Web of Science*. Essa base inclui uma vasta gama de periódicos indexados, bem como permite a busca de artigos de outras de base de dados.

Direcionou-se a busca ao título, resumo e palavras-chave dos artigos²², buscando qualquer variação²³ das palavras-chave: (1) desagregação (*disaggregat**) ou alocação (*OR allocat**); (2) espacial (*spatial**) ou regional (*OR regional**); (3) GEE (*GHG*), emissões (*OR emission**) ou CO₂ (*OR CO₂**); (4) transporte (*transport**) ou energia (*OR energ**)²⁴. Em complemento, não foram considerados artigos que contivessem nos elementos de busca os termos: (1) decomposição (*NOT decomp**); e (2) cidades (*NOT cit**) ou urbano (*urban*). Pelos argumentos expostos nas seções 1.1.1 e 3.0, não foram contemplados artigos que utilizam métodos de decomposição (Kaya, LMDI etc.) ou que desagregam inventários nacionais em cidades.

A busca foi restrita a artigos de periódicos indexados publicados nos últimos dez anos. O resultado dessa iteração de busca é a relação dos artigos identificados. Em seguida, o processo de seleção, baseado na leitura do resumo dos artigos, tem como critério a aderência do conteúdo do resumo contido nos artigos ao objetivo da revisão. Isso significa que são selecionados apenas os trabalhos que buscam desagregar espacialmente os inventários de emissões atmosféricas do setor de transportes.

Por fim, o processo de inclusão considera a leitura completa dos artigos. O critério adotado para incluir artigos é a existência de informações detalhadas o suficiente para replicar o modelo ou compreender como a estimativa foi conduzida. Para facilitar esse processo, elaborou-se uma relação de elementos-chave para a análise (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Elementos coletados e analisados na revisão sistemática

Categoria	Parâmetros
Delimitação geográfica	País e entidade subnacional envolvida no estudo
Periódico	Revista indexada de publicação do estudo
Ano da publicação	Data de publicação entre 2012 e 2021
Autor	-
Setor econômico	Transporte, Indústria, Energia
Atividade	Ambos, carga, passageiros
Modo de transporte	Aéreo, aquático, dutoviário. Ferroviário, rodoviário

²² Na ferramenta, rotula-se como TS.

²³ Ao inserir o caractere ‘*’ em uma palavra, qualquer variação na sua composição deverá ser considerada válida (por exemplo, *spatial*, *spatially* etc.).

²⁴ Dado que o setor de transportes é um subsetor do setor de Energia.

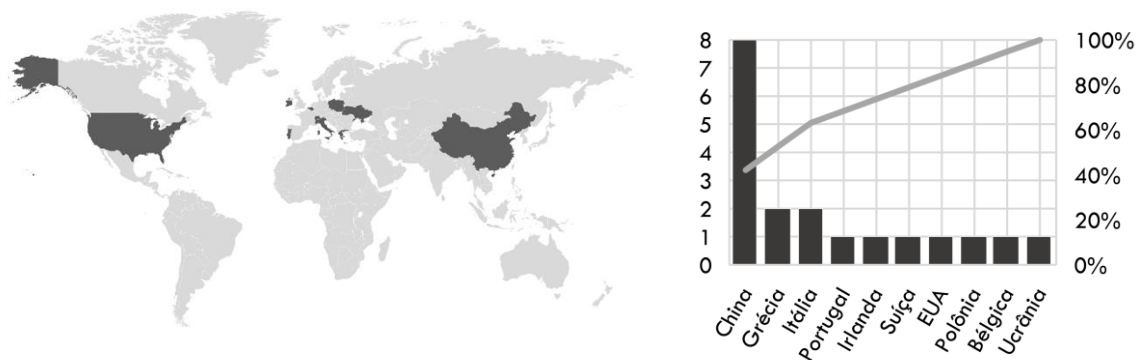
Categoria	Parâmetros
<i>Tier</i>	<i>Tier 1, tier 2 ou tier 3</i>
Abordagem principal	Referência, setorial
Linha de base	Horizonte temporal
Variável de alocação (proxy)	Variáveis utilizadas para desagregar estimativas
Checagem e consistência	Métodos ou variáveis de calibração e validação
Gases desagregados	CO ₂ , não-CO ₂
Barreiras	Impedâncias relatadas à alocação
MRV	Sim, não
Ferramenta de monitoramento	Caso o artigo implemente MRV

Fonte: autor.

Especificamente, busca-se verificar se o estudo: (i) considera a desagregação de inventário nacional em inventários estaduais/provinciais ou regionais; (ii) aborda o setor de transportes e desagrega, pelo menos, um tipo de atividade (carga ou passageiros); (iii) detalha as variáveis, incluindo as unidades de comercialização, e suas fontes que serão adotadas no processo de desagregação; e (iv) detalha o método e a sua aplicação. O procedimento complementar *Snowballing* considera os mesmos protocolos de identificação, seleção e inclusão de artigos. Caso haja novos artigos inclusos, repete-se as iterações de busca nas referências até que não haja mais artigos identificados.

A partir do protocolo convencional de revisão sistemática, a aplicação das *strings* de busca na base de indexação considerada resultou na identificação de 124 artigos científicos. Após a leitura dos resumos dos artigos e na verificação da sua aderência ao objetivo da revisão sistemática, foram selecionados 20 artigos. Nesse processo, a maior parte dos artigos desconsiderados, tem como objetivo a identificação das forças direcionadoras que afetam o padrão de emissões dos países. Além disso, há artigos que inventariam municípios ou utilizam métodos de decomposição para desagregar indicadores, apesar da tentativa de remover esses elementos nas palavras-chave.

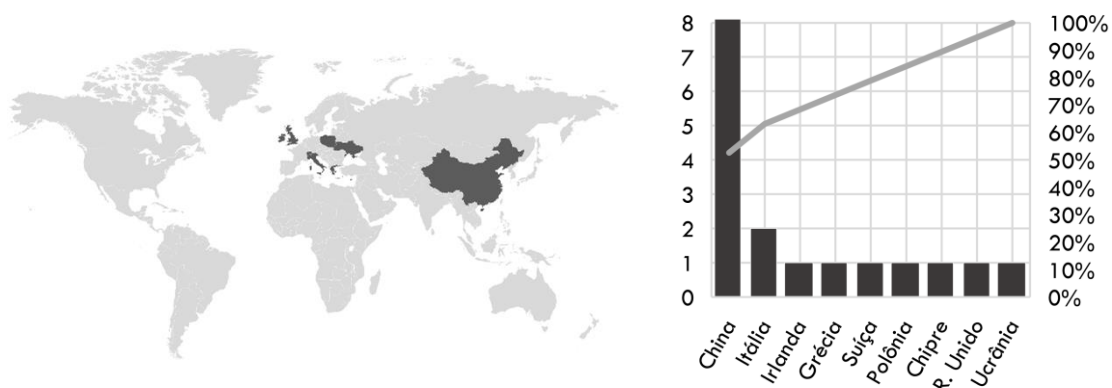
A Figura 3.2 ilustra os países de origem dos artigos selecionados, bem como a quantidade de artigos selecionados por país. As autorias dos artigos são oriundas dos maiores países emissores (China, EUA e União Europeia) (UNEP, 2021), o que sinaliza uma preocupação em atingir metas de mitigação ou simplesmente em compreensão do perfil de emissões do país. Infere-se também que esses países já atingiram um patamar metodológico robusto para inventários nacionais de emissões e buscam aprofundar a compreensão dos resultados obtidos, analisando a participação e o potencial individual dos estados.



Fonte: autor.

Figura 3.2. Países de origem dos artigos selecionados

Ao analisar o conteúdo dos artigos, constata-se que o país de aplicação não necessariamente é o mesmo de origem da autoria principal (Figura 3.3). Isso pode indicar a existência de restrições de acesso a dados locais de atividade nos países de origem, implicando na aplicação do procedimento em outros países. Nesse raciocínio, a China é contemplada com duas aplicações em estudos originários de outros países. O Reino Unido e o Chipre também recebem uma aplicação cada.

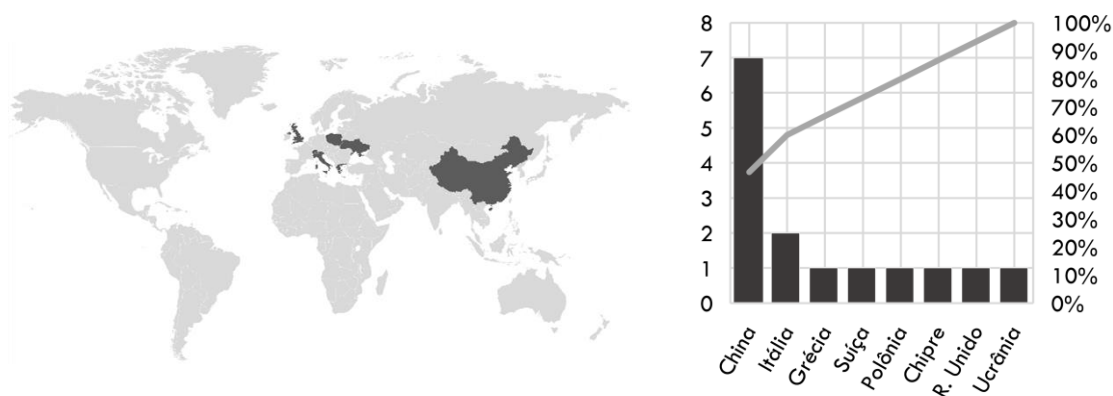


Fonte: autor.

Figura 3.3. Países de aplicação dos artigos selecionados

Na etapa de inclusão, os artigos selecionados foram lidos por completo, resultando na inclusão de 10 artigos. Nesse ponto, verifica-se que poucos artigos abordam a desagregação espacial de inventários de emissões atmosféricas do setor de transportes ou, pelo menos, poucos detalham a metodologia utilizada de forma a identificar claramente os elementos expostos na Tabela 3.1. Para ampliar a busca, conduziu-se o procedimento *Snowballing* nos artigos incluídos da revisão sistemática. Essa atividade resultou na

inclusão de mais cinco artigos, totalizando 15 ao final da revisão sistemática. A Figura 3.4 apresenta os países de aplicação dos artigos inclusos.



Fonte: autor.

Figura 3.4. Países de aplicação dos artigos inclusos

Como a revisão bibliográfica sistemática identificou apenas artigos científicos de periódicos indexados, não é possível a realização de um mapeamento dos relatos oficiais dos países, identificando se modelos foram elaborados no âmbito de projetos ministeriais, mas não publicados cientificamente. Isto posto, é realizada uma pesquisa documental em relatos nacionais publicados de fontes governamentais, selecionando países em que há desagregação espacial. Esse esforço resultou em cinco publicações, quatro publicadas nos últimos dois anos, evidenciando o fator inovador do tema.

A Tabela 3.2 mostra os resultados da revisão sistemática, estruturados conforme as categorias expostas na Tabela 3.1, bem como da revisão documental. Ressalta-se que houve a necessidade de reduzir os requisitos para que um artigo seja incluso, uma vez que poucos artigos se adequaram ao estabelecido previamente.

Tabela 3.2. Síntese dos artigos incluídos na revisão sistemática

Autor	Inventário nacional (input)						Inventário subnacional (output)							
	País	Setor econômico	Tier	Abordagem principal	Linha de base	Modo de transporte	Resultados				Variável de alocação (proxy)	Checagem e consistência	MRV	
							Por modo	Por atividade	CO ₂	Não-CO ₂				
Sistemática	Ferreira <i>et al.</i> (2013)	Portugal	Transportes	2	Bottom-up	2007	RO (1)	Não	Não	Não	CO, NMVOC, NO _x , SO _x , NH ₃ , PM ₁₀ e PM _{2,5}	Fluxo de tráfego, população	Inventários de emissões	Não
	Gkatzoflias <i>et al.</i> (2013)	Grécia	Indústria e Transportes	2	Bottom-up	N/C	RO (1)	Não	Não	Não	CO, NO _x , PM _{2,5} , NH ₃ , NMVOC e SO ₂	Fluxo de tráfego e frota	Inventários de emissões	Não
	Hiller <i>et al.</i> (2014)	Suíça	Todos	2 e 3	Bottom-up	2011	RO (1)	Não	Não	Não	CH ₄	N/C	Inventários de emissões	Não
	Hao <i>et al.</i> (2015)	China	Indústria	1	Top-down	1995-2011	Não separa	Não	Não	Sim	Não	Consumo energético	Intensidade energética	Não
	Iodice e Senatore (2016)	Itália	Todos	3	Bottom-up	N/C	RO (1)	Não	Não	Não	HC, VOC, NO _x , PM ₁₀	Fluxo de tráfego, frota e consumo energético	N/C	Não
	Zheng <i>et al.</i> (2016)	China	Indústria	1	Top-down	2011-2013	Não separa	Não	Não	Não	VOC	População	Inventários de emissões	Não
	Saikawa <i>et al.</i> (2017)	EUA	Indústria e Transportes	1	Top-down	2000-2008	RO (1)	Não	Não	Sim	CO ₂ , CO, SO ₂ , NO _x e	N/C	N/C	Não
	Zasina e Zawadzki (2017)	Polônia	Transportes	1	Top-down	N/C	RO (1)	Não	Não	Sim	Não	População	N/C	Não
	La Notte <i>et al.</i> (2018)	Itália	Transportes	3	Bottom-up	N/C	RO (1)	Não	Sim	Sim	N ₂ O, CH ₄ e CO ₂	N/C	Cálculo top-down local	Não
Han <i>et al.</i> (2021)	China	Transportes	N/C	ASIF	N/C	RO (1)	Não	Sim	Sim	Não	PIB	Quilometragem produzida	Não	
Snowballing	Bo <i>et al.</i> (2008)	China	Indústria e Transportes	1	Top-down	2005	RO (1)	Não	Não	Não	NMVOC	População e PIB	Inventários de emissões	Não
	Gkatzofliasa <i>et al.</i> (2009)	Grécia	Transportes	2 e 3	Bottom-up	2008	RO-AE-AQ (3)	Não	Não	Não	CO, NO _x , PM _{2,5} , NH ₃ , NMVOC e SO ₂	População e PIB	Inventários de emissões	Não
	Maes <i>et al.</i> (2009)	Bélgica	Transportes	2	Bottom-up	2005	RO (1)	Não	Não	Não	CO, NH ₃ , NMVOC, NO _x , PM ₁₀ , SO ₂	População	Inventários de emissões	Não

Autor	Inventário nacional (input)						Inventário subnacional (output)							
	País	Setor econômico	Tier	Abordagem principal	Linha de base	Modo de transporte	Resultados				Variável de alocação (proxy)	Checagem e consistência	MRV	
							Por modo	Por atividade	CO ₂	Não-CO ₂				
Bun <i>et al.</i> (2010)	Ucrânia	Transportes	1 e 2	Bottom-up	2004	RO (1)	Não	Sim	Sim	CH ₄ e N ₂ O	Consumo energético e intensidade de uso	Cálculo top-down local	Não	
Boychuk <i>et al.</i> (2012)	China	Transportes	1	Bottom-up	N/C	RO (1)	Não	Não	Sim	CH ₄	Consumo energético, frota, intensidade de uso, fluxo de tráfego, população	N/C	Não	
Documental	MAYDS (2015)	Argentina	Todos	1	Top-down	2012	RO-FE-AE-AQ-DU (5)	Sim (5)	Sim	Sim	CH ₄ e N ₂ O	Consumo energético	N/C	Não
	Brasil (2021)	Brasil	Todos	2 e 3	Bottom-up	1990-2016	RO-FE-AE-AQ (4)	Não	Não	Sim	CH ₄ e N ₂ O	Consumo energético	N/C	Não
	ISPRA (2022)	Itália	Todos	1	Top-down	2019	RO-FE-AE-AQ (4)	Não	Não	Sim	CH ₄ , N ₂ O, SO ₂ , NO _x , NMVOC e PM ₁₀	Quilometragem de rodovias, fluxo de tráfego, movimentação de passageiros	N/C	Não
	SEEG (2022)	Brasil	Todos	2 e 3	Bottom-up	1980-2020	RO-FE-AE-AQ (4)	Não	Não	Sim	CH ₄ e N ₂ O	Consumo energético	Inventários de emissões	Não
	EPA (2022)	EUA	Todos	2 e 3	Bottom-up	1990-2019	RO-FE-AE-AQ-DU (5)	Não	Não	Sim	CH ₄ e N ₂ O	Consumo energético e intensidade de uso	Inventários de emissões	Não

Legenda:

RO: Rodoviário
FE: Ferroviário
AR: Aéreo
AQ: Aquático
DU: Dutoviário
N/C: Não consta/disponível

Fonte: autor.

Nesta primeira análise, considera-se apenas os artigos inclusos por meio da revisão sistemática e *Snowballing*. Neste recorte, somente Gkatzofliasa *et al.* (2009) modelaram a desagregação espacial em mais de um modo de transporte, além do transporte rodoviário. No entanto, não explicitaram se consideraram a atividade de carga ou de passageiros. Nesse caso, apenas Bun *et al.* (2010) e La Notte *et al.* (2018) descreveram a desagregação das atividades de carga e passageiros, aumentando a consistência dos resultados. Ambos os estudos utilizaram inventários locais, elaborados por uma abordagem *top-down*, para avaliar a consistência da desagregação espacial.

A maior parte dos artigos utilizaram modelos *tier 1* para a desagregação, ou seja, consideraram FE *default* do estudo do IPCC (2006). Com exceção de Gkatzofliasa *et al.* (2009) e Hiller *et al.* (2014), os que adotaram *tier 2* também consideraram FE *default*, por meio da abordagem setorial para gases não-CO₂ (Seção 2.3.2).

Mais além, 60% dos artigos modelaram inventários por uma abordagem *bottom-up*, possivelmente pelo maior nível de detalhes dessa abordagem, o que gera maior quantidade de dados para conduzir a desagregação espacial. Isso pode ser observado nos estudos de Bun *et al.* (2010), Boychuk *et al.* (2012), Ferreira *et al.* (2013), Gkatzoflias *et al.* (2013), Iodice e Senatore (2016), que utilizaram dados de atividade como variáveis *proxy* para alocar as emissões regionalmente.

Nessa linha, atenta-se que a maior parte dos artigos que utilizaram variáveis *proxy* genéricas de população, energia e PIB consideraram abordagens *top-down*. Isso pode ser explicado, visto que essas variáveis *proxy* não dependem de dados de atividade (por exemplo, pass-km ou t-km) dos modos de transporte.

Em síntese, as variáveis *proxy* mais utilizadas nos artigos inclusos foram: (1) população (6 citações); (2) consumo energético (4 citações); fluxo de tráfego (4 citações); frota e PIB (3 citações); e intensidade de uso (2 citações). Salienta-se que os estudos de Hiller *et al.* (2014), Saikawa *et al.* (2017) e La Notte *et al.* (2018) não detalharam quais variáveis foram utilizadas para alocar as emissões às entidades subnacionais.

Por sua vez, 11 artigos buscaram avaliar a consistência dos resultados. Destes, 55% utilizaram inventários de emissões atmosféricas nacionais, de fontes independentes, para avaliar se os dados são equivalentes. Dezoito por cento dos artigos se basearam na utilização de inventários locais (*top-down*) em amostras selecionadas para avaliar a consistência da desagregação espacial (BUN *et al.*, 2010; LA NOTTE *et al.*, 2018). Por fim, Hao *et al.* (2015) adotaram a intensidade energética para avaliar a consistência.

Quanto à modelagem da linha de base, somente 60% dos artigos descreveram o ano considerado para a desagregação espacial. Destes autores, a maioria (60%) consideraram estimativas para apenas um ano. Destacam-se os estudos de Hao *et al.* (2015), que desagregou as emissões para 16 anos, enquanto Saikawa *et al.* (2017) e Zheng *et al.* (2016) modelaram 8 anos e 2 anos, respectivamente.

Há uma variedade de GEE diretos e indiretos modelados, além de poluentes atmosféricos. Não obstante, nenhum estudo estimou o GEE direto HFC ou o poluente atmosférico RCHO. Ademais, alguns elementos aumentam as incertezas das estimativas, sobretudo para gases não-CO₂, como: (i) o pouco nível de detalhes das abordagens utilizadas, adotando abordagens *tiers* 1 e 2. Cerca de 90% dos artigos modelam apenas o transporte rodoviário, que possui a maior quantidade de fontes móveis e variedades de fontes energéticas; (ii) a maior parte dos artigos que modelam gases não-CO₂ não utilizaram variáveis *proxy* de atividade para desagregar espacialmente as emissões. Tais estudos consideraram variáveis genéricas como população e PIB; (iii) somente Hao *et al.* (2015) consideraram dados de intensidade para avaliar a consistência dos resultados. Desconsiderar essas variáveis permite alocações de volumes emitidos e energia inconsistentes com a tecnologia existente no país²⁵.

Observa-se que nos estudos de Gkatzofliasa *et al.* (2009) e Maes *et al.* (2009), apesar de constar a utilização de abordagens *bottom-up*, os autores utilizaram variáveis genéricas de população ou PIB para desagregar gases não-CO₂. Caso os FE considerados dependam de variações de tecnologia, a não utilização de variáveis de atividade (por exemplo, intensidade de uso e frota) aumenta substancialmente a incerteza.

A segunda análise se concentra nos resultados da pesquisa documental sobre relatos oficiais de governos. O Brasil iniciou os esforços em 2021, no relatório do MCTI denominado ‘Resultados do Inventário Nacional de emissões de GEE desagregado por Unidade Federativa’ (Brasil, 2021). Trata-se da implementação do método inicialmente proposto pela equipe da 4ª Comunicação (Brasil, 2020), desagregando os seus resultados.

Apesar de a 4ª Comunicação inventariar os modos de transporte, rodoviário, ferroviário, aéreo e aquático, a desagregação reporta apenas os resultados de emissões absolutas por estado. Outrossim, o transporte dutoviário não foi incluso no inventário,

²⁵ Nesse caso hipotético, seria possível aumentar excessivamente a eficiência energética de um modo de transporte (pass/km/TJ ou t-km/TJ), apenas alocando a energia de forma errada. O que compromete as estimativas desagregadas.

tampouco na desagregação. O estudo também não desagregou os dados em nível de atividade de passageiros e de carga, reduzindo as possibilidades de análise do perfil de emissão dos estados e de acompanhamento de indicadores a nível de MRV.

O estudo do MCTI considera apenas a variável *proxy* de energia por estado, sem informação sobre como o consumo fora balanceado entre os diversos setores da economia que consomem os mesmos combustíveis. Apenas os GEE CO₂, CH₄ e N₂O foram desagregados, apesar de a 4^a Comunicação inventariar GEE indiretos como CO, NO_x e NMVOC, embora isso demande um esforço adicional em desagregar considerando uma abordagem *tier 3*. Por fim, o estudo não apresenta protocolo quantitativo para verificação de consistência dos resultados desagregados.

Ainda no cenário brasileiro, o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) desagrega emissões nacionais a nível de estados e municípios. Apesar de não ser um relato oficial de órgão governamental, como o SEEG incorpora o método das comunicações nacionais brasileiras, os seus protocolos foram incorporados neste estudo. Assim como a 4^a Comunicação, o modelo não desagrega o transporte dutoviário, bem como não aloca a energia e emissões em nível de atividade (passageiros e carga). Os gases modelados e desagregados são o CO₂, CH₄ e N₂O. Por fim, o método é validado apenas por inventários de emissão estaduais e não fornece indicadores que possam ser apropriados em estruturas de MRV.

Assim como no Brasil, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) iniciou as estimativas estaduais a partir do estudo EPA (2022b), complementar ao inventário nacional EPA (2022a). Dentre os estudos governamentais, apresenta o maior nível de detalhes, por exemplo, incluindo o modo dutoviário no inventário nacional. Contudo, o modelo da EPA não apresenta resultados desagregados por modo e tipo de atividade, apenas o valor absoluto do setor de transportes de cada estado para os gases CO₂, CH₄ e N₂O, conseqüentemente, não fornecendo também indicadores de MRV. Não obstante, o modelo da EPA descreve os protocolos considerados para abatimento de emissões de setores não-transportes e do transporte internacional (*bunker*), atividade não relatada nos demais estudos analisados.

Outra peculiaridade do modelo da EPA reside na aplicação de abordagem *tier 3* para estimar o consumo do transporte rodoviário a nível estadual, considerando, para isso, dados de intensidade de uso. Apesar disso, não desagrega GEE indiretos ou poluentes atmosféricos. Nesse aspecto, o estudo do Departamento de Mudanças Climáticas do

Governo Australiano (DCCEEW, 2022) também apresenta estimativas estaduais baseadas em *tier 3* para o transporte rodoviário. Todavia, o método não se trata de uma desagregação do inventário nacional, mas da consolidação de inventários estaduais originalmente conduzidos de forma independente, o que não se enquadra no objeto de estudo da presente pesquisa e, portanto, não foi incluso na revisão documental.

A Itália, por meio do estudo ISPRA (2022), desagrega as emissões dos gases CO₂, CH₄, N₂O, SO₂, NO_x, NMVOC e PM₁₀, apenas para o ano de 2019, com base em dados de quilometragem de rodovias, fluxo de tráfego e movimentação de passageiros. Contudo, considera um inventário nacional elaborado por abordagem *tier 1*, o que implica no baixo nível de detalhes das estimativas, não incluindo também o transporte dutoviário. Nessa linha, os resultados não são apresentados por modo de transporte ou por tipo de atividade. Outrossim, o inventário não relata análise de consistência com inventários, balanços ou matrizes energéticas estaduais, assim como não fornece detalhes que permitam o relato de indicadores de MRV. A ausência de protocolo de análise de consistência, bem como a inexistência de uma linha de base, torna bastante elevada a incerteza associada aos resultados da desagregação.

Finalmente, o Ministério de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, da Argentina (MAyDS, 2015), publicou o estudo governamental mais antigo identificado na revisão documental, considerando os critérios aderentes ao objeto de estudo desta pesquisa. Assim como o estudo ISPRA (2022), a desagregação foi baseada em apenas um ano (2012), conduzida sobre um inventário de abordagem *tier 1*. Apesar disso, o estudo desagrega todos os modos de transporte, incluindo dutoviário, a nível de atividade. Todavia, a única variável *proxy* considerada foi o consumo energético estadual, sem protocolo de verificação de consistência, tampouco indicadores de MRV. O estudo desagregou os gases CO₂, CH₄ e N₂O.

Diante do exposto, para efeito deste estudo, sugere-se que, no caso do gás CO₂, seja utilizado o consumo energético como variável *proxy* para desagregar espacialmente, uma vez que suas emissões consideram o conteúdo de carbono do combustível. Para os outros gases, variáveis *proxy* de atividade (por exemplo, frota, intensidade de uso, atividade de transporte etc.) propiciam maior sensibilidade às alocações. De todo modo, essas sugestões dependem da quantidade de detalhes disponíveis no país e nas entidades subnacionais modeladas.

Apesar do potencial científico, nenhum artigo relacionou a desagregação espacial a estruturas de MRV. Isso representa a identificação de uma lacuna importante na literatura especializada, haja vista que impossibilita que cada entidade subnacional compreenda a sua participação no resultado nacional, identificando os elementos que mais contribuem para as emissões nacionais.

Em virtude da importância desse tema e da sua ausência nos artigos analisados na revisão sistemática, optou-se por conduzir uma pesquisa documental complementar com foco em identificar os indicadores de MRV mais aderentes ao objetivo deste estudo (Seção 3.3). Nesse caso, a busca se direciona a relatórios técnicos de instituições de referência (governamentais, acadêmicas ou privadas).

3.2 Pesquisa complementar em Mensuração, Relato e Verificação

Dado que nenhum artigo selecionado na revisão sistemática aborda estruturas de MRV, seja para estimativa ou desagregação espacial dos inventários nacionais, optou-se por fazer uma pesquisa documental em relatórios setoriais. É comum que relatórios técnicos, embora cientificamente robustos, não constem em bases de indexação. Por conseguinte, o objetivo dessa pesquisa complementar é obter uma lista preliminar de indicadores que possam ser utilizados em uma estrutura de MRV no escopo das emissões.

Bueno e Bartrina (2017) propõem o agrupamento das estruturas de MRV em: (1) Indicadores nacionais de alto nível; (2) Indicadores setoriais; e (3) Resposta no nível de ação. Os indicadores nacionais de alto nível monitoram o grau em que o país avança para alcançar seus objetivos e incluem, por exemplo, a produtividade de carbono medida pelas emissões de GEE *per capita* (CO₂e /população) ou por PIB e PIB *per capita* (CO₂e /PIB ou CO₂e/PIB *per capita*).

Os indicadores setoriais são produto das abordagens de referência e setorial (BUENO e BARTRINA, 2017). Como exemplo, tem-se a intensidade de carbono por atividade do setor e do modo de transporte (tC/pass-km ou tC/t-km). Por fim, os indicadores de resposta no nível de ação representam o impacto individual para cada uma das ações de mitigação (escopo não considerado neste estudo). Ao todo, foram analisados 13 relatórios técnicos ou artigos que propõem estruturas de MRV para o setor de transportes. A Tabela 3.3 apresenta os resultados da análise dos relatórios.

Tabela 3.3. Indicadores de MRV coletados na revisão documental

Esferas	Indicadores de MRV	Unidade	Bygrave (2003)	Dimovski (2014)	Eichhorst e Bongardt (2015)	Robertson <i>et al.</i> (2015)	Füssler <i>et al.</i> (2016)	Bueno e Bartrina (2017)	Eichhorst <i>et al.</i> (2017)	Vieweg (2017)	Fridel <i>et al.</i> (2018)	Füssler <i>et al.</i> (2018)	La Rovere <i>et al.</i> (2019)	Gonçalves <i>et al.</i> (2019)	Goes <i>et al.</i> (2020a)	Total de citações
Energia	Consumo energético por combustível ou modo de transporte	tep, mWh	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	12
	Intensidade energética do transporte de passageiros	kJ/p.km	x		x		x				x	x	x	x	x	8
	Intensidade energética do transporte de carga	kJ/t.km	x				x				x	x	x	x	x	7
	Participação de energia renovável	%	x		x	x							x	x	x	6
	Consumo energético <i>per capita</i>	tep/habitante					x					x				2
	Consumo energético de fontes alternativas <i>per capita</i>	tep/habitante							x							1
	Rendimento energético por categoria de veículo	km/l		x												1
Emissões	Emissões por GEE ou poluente atmosférico	Gg	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
	Fatores de emissão implícitos	tC/TJ			x		x		x			x				4
	Intensidade de carbono do transporte de passageiros	CO ₂ e/p.km; CO ₂ e/MJ					x	x				x	x		x	5
	Intensidade de carbono do transporte de carga	CO ₂ e/t.km; CO ₂ e/MJ					x	x				x	x		x	5
	Emissões <i>per capita</i>	CO ₂ e/habitante			x			x	x				x	x	x	6
	Emissões por PIB/PIB <i>per capita</i>	CO ₂ e/PIB						x					x	x	x	4
Atividade	Atividade de transporte de passageiros	pass-km				x	x	x		x	x	x	x		x	8
	Atividade de transporte de carga	t-km				x	x	x			x	x	x		x	7
	Divisão modal	%				x	x		x			x	x		x	6
	Frota circulante por categoria de veículo	Veículos			x		x				x	x	x		x	6
	Participação de veículos elétricos e híbridos na frota por tipo	%		x		x	x					x	x		x	6
	Ocupação ou lotação média de passageiros e carga	t ou passageiros/veículo					x			x		x				3
	Intensidade de uso por categoria de veículo	km/ano					x					x				2
	Taxa de motorização	veículos/1000 habitantes					x					x				2

Fonte: autor.

Por efeito das características fundamentais dos inventários de emissões atmosféricas, observa-se que 92% dos relatórios sugerem a utilização de indicadores que estimam o consumo energético por combustível ou modo de transporte (ou variações da medição do consumo total) e emissões por GEE ou poluente atmosférico. Nesse tocante, os únicos relatórios que não citaram ambos os indicadores foram Bueno e Bartrina (2017), que focam as estimativas em indicadores de intensidade de carbono e atividade de transporte, e Dimovski (2014), que direciona os indicadores para a relação entre indivíduos e o setor de transportes (novamente, escopo não considerado neste estudo).

Em seguida, indicadores que medem a intensidade de carbono (tC/t-km ou tC/pass-km) ou energética (kJ/t-km ou kJ/pass-km) foram citados por cerca de 60% dos autores. Indicadores de intensidade medem com precisão o grau de penetração de políticas de baixo carbono e eficiência energética em um setor (FÜSSLER *et al.*, 2016). Fundamentalmente, são importantes para compor estruturas de MRV (BUENO; BARTRINA, 2017).

A estimativa de indicadores de intensidade necessita do cálculo preliminar da atividade de transporte de carga (t-km) ou passageiros (pass-km) (citados por 60% dos autores). Ambos os indicadores são mais recorrentes após o consumo energético e as emissões de GEE ou poluentes atmosféricos. Em complemento, a partir da atividade de transporte, pode-se calcular a divisão modal por modo e atividade (GONÇALVES *et al.*, 2019b).

Somente Dimovski (2014) propõe o indicador de rendimento energético por categoria de veículo (km/l). Possivelmente, a ausência de menções a esse indicador decorre da sua natureza em estudos semelhantes, ou seja, trata-se de uma variável de entrada em modelos *bottom-up* de uso de energia e emissões (ALAM *et al.*, 2017). Nota-se que os indicadores mais citados na Tabela 3.2 são produtos dos modelos, sendo, portanto, mais recorrentes em estruturas de MRV.

Curiosamente, uma fração maior dos relatórios (33%) sugere a utilização do indicador de fatores de emissão implícitos²⁶ em uma estrutura de MRV (BONGARDT, 2015, FÜSSLER *et al.*, 2016, EICHHORST *et al.*, 2017, FÜSSLER *et al.*, 2018, EICHHORST). Todavia, também se trata de uma variável de entrada de modelos *bottom-*

²⁶ Fator de emissão usualmente adotado para completar séries históricas com lacunas. Trata-se da razão entre emissões de um determinado gás, calculadas por abordagem *tier 3*, e o consumo energético de um determinado modo de transporte ou tipo de atividade.

up de uso de energia e emissões (GONÇALVES *et al.*, 2019b). Nesse caso, pode-se explicar por estar diretamente relacionado com o total emitido não apenas de CO₂, que varia com o consumo energético, como também de gases não-CO₂ (N₂O, CH₄, CO, NO_x, NMVOC etc.), conforme a quilometragem percorrida (BRASIL, 2014).

Os relatórios demonstram preocupação em compreender o perfil das emissões atmosféricas. Assim, Bygrave (2003), Eichhorst e Bongardt (2015), Robertson *et al.* (2015) Gonçalves *et al.* (2019) e Goes *et al.* (2020a) sugerem a estimativa do indicador de participação de energia renovável no total consumido. Inclui-se, por exemplo, a fração dos biocombustíveis e eletricidade.

Indicadores que avaliam uma variável em relação a uma determinada população²⁷, como: consumo energético *per capita*, consumo energético de fontes alternativas *per capita* e emissões por PIB/PIB *per capita* receberam menos atenção dos autores. A exceção é o indicador de emissões *per capita*, citado por Eichhorst e Bongardt (2015), Bueno e Bartrina (2017), Eichhorst *et al.* (2017), Gonçalves *et al.* (2019) e Goes *et al.* (2020a).

Pode-se inferir que, no escopo das emissões atmosféricas, os autores não enfatizam indicadores populacionais ao modelarem o setor em uma escala nacional. Possivelmente, essa tendência é inversa ao estimar indicadores de MRV dentro dos escopos ‘Ações de mitigação’ e ‘Suporte’ (SINGH *et al.*, 2016). Sobretudo, se considerar o agrupamento de abrangência local ‘Resposta no nível de ação’ (BUENO e BARTRINA, 2017), conforme discutido no início desta seção.

Os relatórios com estruturas de MRV mais detalhadas são os de Füssler *et al.* (2016), Füssler *et al.* (2018) e La Rovere *et al.* (2019). Os dois primeiros relatórios são resultados de estudos abrangentes sobre indicadores que podem ser utilizados em estruturas de MRV do setor de transportes.

No caso do estudo de La Rovere *et al.* (2019), Gonçalves *et al.* (2019) e Goes *et al.* (2020a), busca-se estimar indicadores de MRV a partir de uma série de medidas de mitigação, o que o insere no escopo Ações de Mitigação (SINGH *et al.*, 2016). Todavia, pode-se afirmar que diversos indicadores desse escopo também se enquadram no escopo Emissões, objeto de estudo deste estudo.

²⁷ Indicadores *per capita*.

3.3 Considerações do Capítulo 3

Neste capítulo, conduziu-se a pesquisa sistemática da literatura em procedimentos para desagregar espacialmente inventários nacionais de GEE em entidades subnacionais, utilizando três procedimentos complementares: revisão sistemática, *Snowballing* e revisão documental. Além disso, endereçou-se uma pesquisa documental complementar em indicadores de MRV, associando-os com o escopo ‘Emissões’.

Os resultados da pesquisa sistemática mostram que há importantes lacunas na literatura quanto à desagregação espacial de inventários nacionais de emissões atmosféricas em entidades subnacionais. Majoritariamente, os modelos utilizam abordagens com menor nível de detalhes como *tiers* 1 e 2, e para poucos ou apenas um ano. Isso motiva a utilização de variáveis *proxy* genéricas como população e PIB, o que reduz a sensibilidade das alocações das emissões atmosféricas às entidades subnacionais e, conseqüentemente, as possibilidades de avaliar a consistência desses dados.

Apesar de os estudos modelarem uma vasta gama de gases não-CO₂, as abordagens utilizadas não condizem com o esperado para a mensuração desses gases com precisão, sobretudo na ausência de protocolos de verificação de consistência e na vasta ausência da divisão dos resultados de energia e emissão em passageiros e carga. Além disso, nenhum estudo modelou o importante GEE HFC e o composto RCHO.

Em complemento, nenhum artigo ou relatório governamental proveu indicadores que possam ser utilizados em estruturas de MRV. Para aprofundar nessa lacuna, explorou-se os indicadores de MRV pela pesquisa documental. Nesse caso, os resultados evidenciam que, no escopo das emissões atmosféricas, os autores não enfatizam indicadores populacionais ao modelarem o setor em uma escala nacional. Os indicadores mais frequentes são o consumo energético por combustível e as emissões por GEE ou poluente atmosférico. Indicadores de atividade e, conseqüentemente, de intensidade também foram citados por cerca de metade dos relatórios técnicos.

Em síntese, há lacuna na literatura quanto a existência de modelo de desagregação que abranja:

1. Um inventário nacional *bottom-up*, *tier* 2, para CO₂ e *tier* 3 (gases não-CO₂), com a linha de base de atividade, energia e emissões dos cinco modos de transporte convencionalmente presentes em países territorialmente vastos;

2. Um procedimento de desagregação da linha de base por modo de transporte e tipo de atividade, incluindo protocolo de abatimento de emissões de setores não-transportes e *bunker*;
3. Um procedimento de desagregação de GEEs diretos e indiretos, além de poluentes atmosféricos, baseados em múltiplas variáveis *proxies* a nível de energia e atividade;
4. Um protocolo de verificação de consistência baseado em inventários, matrizes ou balanços energéticos estaduais; e
5. Indicadores desagregados que possam ser incorporados a estruturas de MRV estaduais, com plena aderência a indicadores de MRV do país (soma zero).

Portanto, o Capítulo 3 endereçou diversas questões e lacunas na literatura que são absorvidas no procedimento para desagregação espacial de inventários nacionais e MRV em entidades subnacionais, conduzido no Capítulo 4.

4. Método

Este capítulo apresenta o procedimento desenvolvido para desagregar espacialmente as estimativas de consumo energético e emissões atmosféricas do setor de transportes, adotando estruturas de MRV regionais. O procedimento foi desenvolvido com base no conhecimento adquirido na pesquisa narrativa e documental conduzida no Capítulo 2, bem como nas lacunas da literatura identificadas nas pesquisas sistemática e documental realizadas no Capítulo 3.

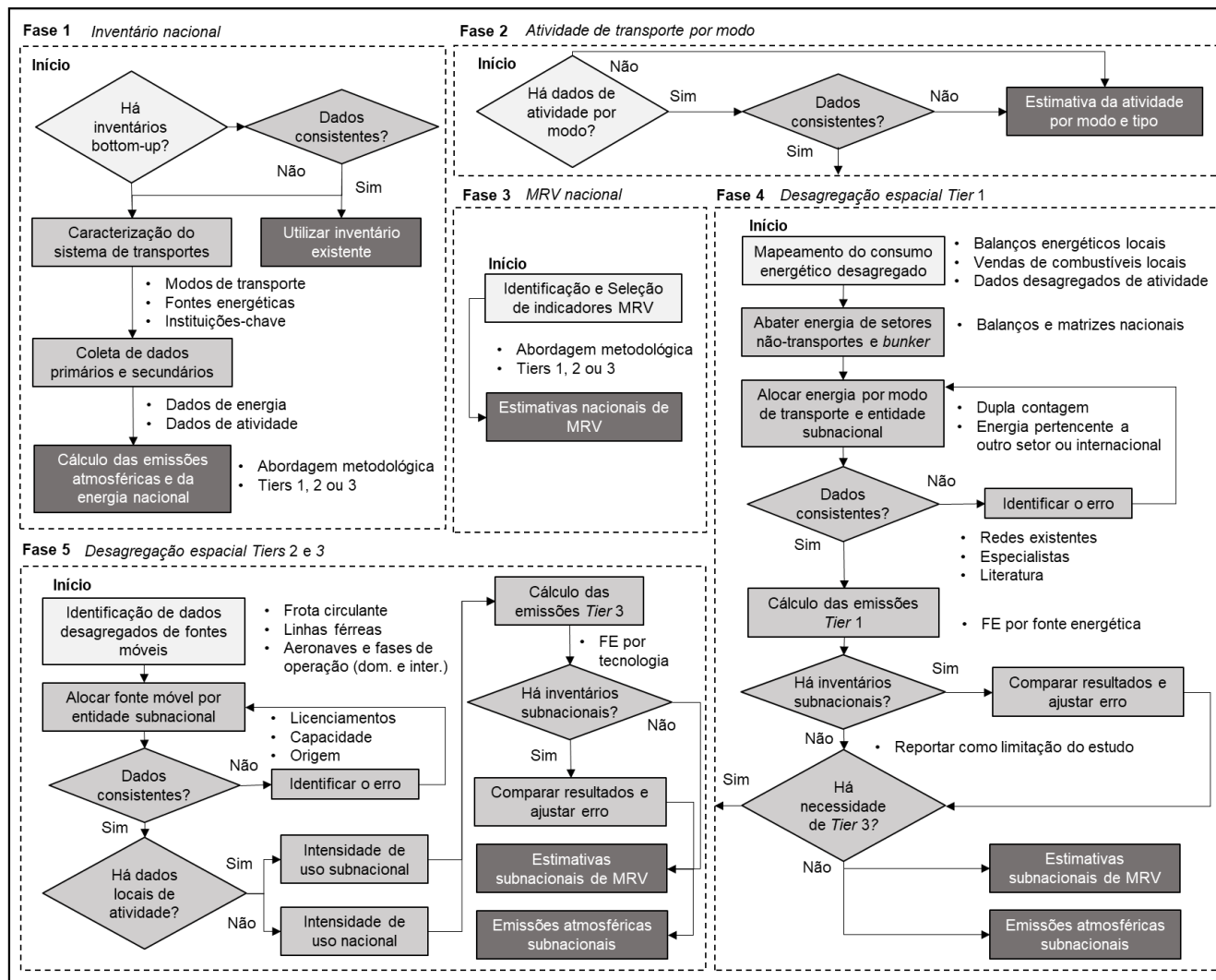
Conforme salientado por Bongardt *et al.* (2016), ao avaliar as emissões do setor de transporte, é necessário estudar a natureza de milhões de pequenas fontes móveis, impulsionadas por uma variedade de fontes de energia (eletricidade, gasolina, diesel, querosene, GNV, biocombustíveis etc.) e operadas por vários indivíduos ou empresas. No processo de modelagem, é fundamental caracterizar o setor para a adequação do procedimento à realidade do país no qual ele é aplicado.

Uma das lacunas identificadas na pesquisa sistemática conduzida é a pouca atenção atribuída aos modos não-rodoviário. No entanto, é evidente que os modos de transporte apresentam variáveis de naturezas próprias que dificultam a adoção de um modelo único de desagregação espacial. Por exemplo, o modo ferroviário é caracterizado pela distribuição espacial de linhas férreas entre regiões, gerenciadas por concessionárias.

A variedade de fontes móveis desse modo é menor em comparação ao transporte rodoviário, o que implica em menos variáveis utilizadas ao desagregar espacialmente as emissões. Esse fenômeno reflete o número de indicadores de MRV necessários para avaliar cada modo de transporte. Nesse raciocínio, quanto maior o *tier* e mais detalhada a abordagem (no caso, a setorial), maior a quantidade de indicadores mensurados.

Em síntese, o procedimento desagrega emissões a partir do nível de detalhamento das estimativas do país. Assim, as atividades de desagregação são divididas de acordo com o *tier* almejado. Caso haja a necessidade de desagregar apenas gases com FE baseados no consumo energético (por exemplo, os GEE CO₂, CH₄ e N₂O), pode-se empregar somente a Fase 4. Por sua vez, caso haja a necessidade de desagregar gases com FE baseados na tecnologia da fonte móvel (no caso brasileiro, poluentes atmosféricos, HFC e alguns GEE indiretos), deve-se empregar também a Fase 5.

A Figura 4.1 ilustra o fluxo lógico de atividades centrais do método proposto.



Fonte: autor.

Figura 4.1. Procedimento desenvolvido para a desagregação espacial de inventários nacionais e estruturas de MRV

4.1 Fase 1: Inventário nacional

Nessa etapa metodológica são realizadas a identificação e caracterização do problema. O problema foi identificado no Capítulo 1, resgatando a problemática histórica sobre falta de informações regionalizadas de emissões e estruturas de MRV, além do custo econômico e político para as obter.

A primeira fase pode ser contornada caso haja um inventário nacional consistente e que reporte parte das variáveis necessárias para o desagregar espacialmente. Nesse caso, a atividade seria de identificação de inventário nacional de emissões atmosféricas e uso de energia. Especificamente, verifica-se se há um inventário *bottom-up* no país que fornece informações sobre dados de atividade por modo de transporte, além do consumo energético e emissões por tecnologia. Caso haja um inventário detalhado, analisa-se a consistência dos seus resultados por meio da compatibilização com parâmetros de referência, como: dados de balanços energéticos nacionais, evolução histórica das emissões, energia, frota circulante etc. Se o inventário for detalhado e consistente, passa-se para a Fase 2.

Na outra vertente, na inexistência de inventário detalhado no país, deve-se conduzir uma estimativa nacional de emissões atmosféricas e energia. Para isso, a primeira etapa é a caracterização do sistema de transportes, identificando os modos de transporte consideradas existentes no país e suas fontes energéticas, assim como as instituições-chave para coleta de dados.

As saídas do fluxo de atividades da Fase 1 são:

1. Quais abordagens e *tiers* podem ser modelados com os dados disponíveis, caso não haja inventários nacionais ou não sejam consistentes e/ou detalhados o suficiente; e
2. O cálculo de inventário nacional de energia e emissões atmosféricas ou a utilização de um inventário consistentemente detalhado o suficiente para possibilitar a desagregação espacial a partir do procedimento desenvolvido neste estudo.

Para que se tenha controle de todas as variáveis utilizadas para se atingir os resultados de estimativa de GEE e uso de energia, opta-se, neste estudo, por modelar um inventário independente. Sugere-se o procedimento para estimativa da linha de base desenvolvido no estudo Gonçalves e D'Agosto (2017) e aperfeiçoado no estudo

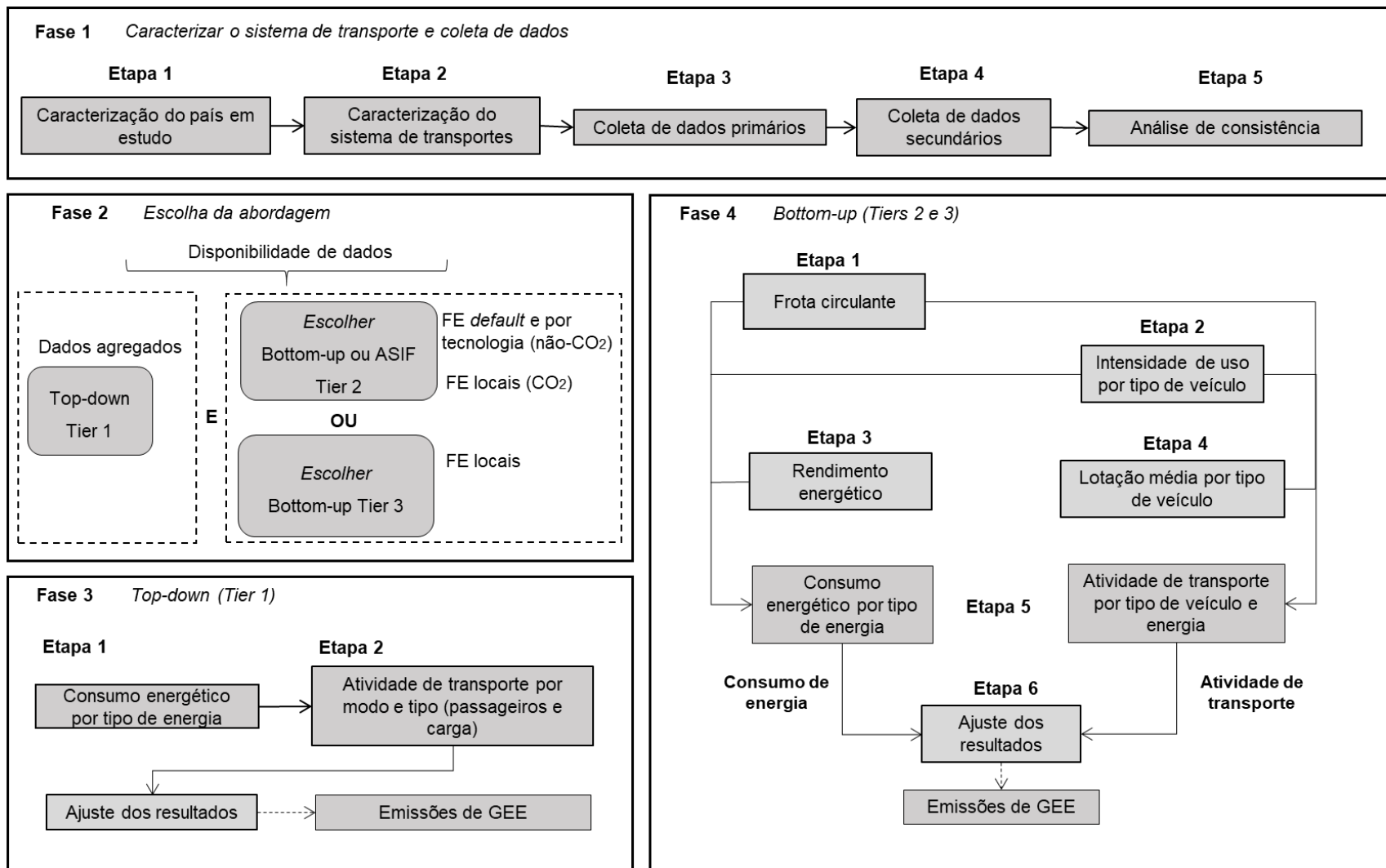
Gonçalves *et al.*, (2019a). O procedimento aperfeiçoado também foi parcialmente implantado na modelagem do setor de transportes da 4ª Comunicação Nacional do Brasil à UNFCCC (Brasil 2020). Dentre os aperfeiçoamentos, cita-se:

1. A calibração, com dados do DPVAT²⁸, dos coeficientes das funções de sucateamento *Gompertz* e Logística para veículos equipados com motores do ciclo diesel e Otto;
2. Novos valores rendimento energético dos caminhões por tecnologia e ano de fabricação;
3. Inserção de veículos leves híbridos e elétricos;
4. Atualização da fatia de mercado de etanol hidratado em veículos do tipo *flexible-fuel* ('curva-flex');
5. Modelagem do modo dutoviário (ASIF e *top-down*); e
6. Utilização do método ASIF para todos os modos não-rodoviário.

Com isso, o procedimento considera o maior nível de detalhes disponíveis em um inventário do setor de transportes no Brasil, até o momento.

A Figura 4.2 ilustra o procedimento de Gonçalves *et al.*, (2019a). Em síntese, adota-se uma abordagem setorial *tiers* 2 (CO₂) e 3 (não-CO₂) para o transporte rodoviário, ASIF *tier* 1 para os transportes aquático, ferroviário e dutoviário, ASIF *tier* 2, usando FE implícitos, para o transporte aéreo. Por fim, modela-se com base na abordagem de referência (*top-down*) todos os modos para calibrar os resultados das estimativas ASIF e *bottom-up*.

²⁸ Seguro Obrigatório de Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Vias Terrestres, obtido com a Superintendência de Seguros Privados (SUSEP).



Fonte: Gonçalves *et al.* (2019a).

Figura 4.2. Procedimento para estimativa nacional emissões atmosféricas e uso de energia

No procedimento *bottom-up*, o uso de energia é estimado pelo produto das variáveis: (1) frota circulante por ano-modelo; (2) rendimento energético por ano-modelo; e (3) intensidade de uso. A frota circulante, calculada apenas nessa abordagem, é estimada a partir dos licenciamentos de veículos automotores (motocicletas, automóveis, comerciais leves, ônibus e caminhões) (Equação 1) e da aplicação das funções de sucateamentos (Equações 2 e 3).

$$FR_{iv,a} = \sum V_{i,v,a} (1 - S_{i,v,a,y}) \quad (1)$$

Em que,

F_r : frota circulante do veículo (v), do combustível tipo (i) e ano (a) (veículo/ano);

$V_{i,v,a}$: vendas anuais do tipo do veículo (v), do combustível tipo (i) e ano (a) (veículo);

$S_{i,v,ay}$: veículos (v), do combustível tipo (i) e ano (a), sucateados no ano (y) (veículo).

$$S_{a,V_{md,k}}^{Gompertz} = \exp \{ - \exp [a + (b * t)] \} \quad (2)$$

$$S_{a,V_{md,k}}^{Logistica} = \frac{1}{\{1+\exp[a(t-t_0)]\}} + \frac{1}{\{1+\exp[a(t+t_0)]\}} \quad (3)$$

No qual,

$S_{a,V_{md,k}}$ = fração de veículos sucateada na idade t;

t = idade do veículo;

a = coeficiente de calibração;

b = coeficiente de calibração.

Com isso, pode-se estimar o consumo energético e as emissões atmosféricas, incluindo GEE diretos e indiretos, utilizando FE *default* (em função da energia) ou locais (em função da energia e tecnologia). A Equação 4 indica o protocolo de cálculo para o consumo energético da abordagem *bottom-up*.

$$C_{i,v,a} = FC_{v,i,a} \cdot \frac{IU_{i,v,a}}{RE_{v,i,a}} \quad (4)$$

Em que,

$C_{i,v,a}$: consumo anual do combustível tipo (i), veículo (v) e ano (a); (m³/ano);
 $FC_{v,i,a}$: frota circulante do veículo (v), combustível tipo (i), ano (a) (veículo/ano);
 $IU_{i,v,a}$: distância percorrida pelo veículo (v), combustível tipo (i) e ano (a) (km);
 $RE_{v,i,a}$: Rendimento energético do veículo (v), do combustível tipo (i), ano (a) (km/l).

As abordagens *top-down* e ASIF quantificam o consumo energético agregado de uma série de informações setoriais, cujos dados significativos são: divisão modal, atividade de transporte, intensidade energética, consumo energético e emissões atmosféricas do setor de transportes (GONÇALVES *et al.*, 2019a). Para efeito da energia, o seu valor é obtido em balanços energéticos nacionais.

As emissões *tier 3* são resultados do produto entre a intensidade de uso anual e os fatores de emissão locais por ano-modelo de veículo (Equação 5). Assim como no estudo de Brasil (2014) e Brasil (2016), considera-se a deterioração de emissões dos gases não-CO₂ por acúmulo de rodagem para automóveis e comerciais leves do ciclo Otto. No caso do estudo de Gonçalves *et al.*, (2019a), insere-se a categoria de híbridos na deterioração (também adotado neste estudo).

Em resumo, modelam-se os valores para comerciais leves e automóveis nas variações de dedicados a gasolina/álcool, *flexible-fuel* e híbridos diesel-elétricos.

$$E_{i,v,a} = IU_{i,v,a} \cdot FE_{i,v,a} \quad (5)$$

Em que,

E_i : emissões da queima do combustível tipo (i), veículo (v) e ano (a) (Gg);
 $IU_{i,v,a}$: distância percorrida pelo veículo (v), combustível tipo (i) e ano (a) (km);
 $FE_{i,v,a}$: fator de emissão para o combustível tipo (i), veículo (v) e ano (a) (g/km).

Conforme Equação 6, as emissões *tier 2* são estimadas com base na multiplicação do consumo anual de cada fonte energética do setor pelo fator de emissão local por unidade de energia (no caso do CO₂).

$$E_i = C_i \cdot FE_i \quad (6)$$

Em que,

E_i : emissões da queima do combustível tipo (i) (Gg);

C_i : consumo anual do combustível tipo (i) (l/ano);

FE_i : fator de emissão do GEE do combustível tipo (i) (kg/l ou tC/TJ);

As estimativas de uso de energia e emissões da abordagem *bottom-up* são ajustadas com base nas saídas do modelo da abordagem *top-down*. Divergências podem ser minimizadas ao ajustar os valores de referência de intensidade de uso e ocupação média do veículo (GONÇALVES *et al.*, 2019a). Ademais, conforme explicitado na Seção 2.3.2, o método setorial ASIF considera variáveis de atividade, energia e emissões em uma equação geral para calcular as emissões atmosféricas no setor de transportes (Equação 7) (Gonçalves, 2018).

$$E = \sum_i A \cdot S_i \cdot I_i \cdot \sum_j F_{i,j} \quad (7)$$

Em que,

E_i : emissões atmosféricas (Gg);

A_i : atividade de transporte do modo i (pass-km ou t-km);

S_i : divisão modal i (%);

I_i : intensidade energética do modo i (kJ/t-km ou kJ/pass-km);

F_i : fator de emissão do combustível j para o modo i (tC/TJ).

4.2 Fase 2: Estimativa da atividade de transporte

Na Fase 2, identifica-se se há dados de atividade de transporte por modo e tipo (passageiros e carga) disponíveis no país, buscando em inventários de emissões atmosféricas existentes ou em relatórios de instituições-chave (nesse caso, associações nacionais de transportadores, agências nacionais, ministérios etc.).

Caso haja essas informações, avalia-se a consistência dos dados. Nessa etapa, verifica-se a presença de um histórico de atividade consistente com variáveis como consumo energético, PIB e PIB *per capita*. Ademais, analisa-se se a divisão modal de passageiros e carga é condizente com o esperado para o país. Se todas essas validações forem consistentes, passa-se para a Fase 3.

Na inexistência de estimativas consistentes de atividade de transporte por modo e tipo no país, calcula-se essa informação. Esse cálculo é realizado pelo produto entre os passageiros ou toneladas transportadas, o comprimento da rede e o percentual de quilometragem transportada útil (GONÇALVES *et al.*, 2019a).

As Equações 8 e 9 mostram o protocolo de cálculo. Fundamentalmente, a atividade de transporte é calculada pelo produto entre o total de passageiros ou toneladas transportadas, o comprimento da rede e a porcentagem da quilometragem efetiva realizada.

$$AT_{m,a}^{top-down} = \sum_l p_l \cdot e_l \cdot km_l \quad (8)$$

$$AT_{m,a}^{bottom-up} = \sum_i F_r \cdot U_i \cdot Av_i \quad (9)$$

Em que,

AT: atividade de transporte por modo (m) e ano (y) (pass-km ou t-km);

p_l: passageiro/carga anual transportada na linha (l);

e_l: rede / linha (l) extensão (km);

km_l: quilometragem efetiva da linha (l) (%);

F_r: frota circulante para o veículo do tipo (i) (unidade/ano);

U_i: veículo percorrido em km (i) (km/ano);

Av_i: Ocupação média do veículo para o tipo de veículo (i).

Finalmente, tem-se dados detalhados o suficiente para calcular indicadores de MRV no escopo de Emissões, aderentes à realidade de dados do país.

4.3 Fase 3: Mensuração, Relato e Verificação

Para efeito deste estudo, a estrutura de MRV desenvolvida considera as diretrizes expostas no Manual sobre Mensuração, Relato e Verificação para Países em Desenvolvimento da UNFCCC (UNFCCC, 2014) e no estudo ICAT (2020). É importante ressaltar que a UNFCCC não define métodos específicos para a atividade de mensuração, mas apoia a utilização de procedimentos estabelecidos pelo IPCC, por exemplo, em

comunicações nacionais e estimativas bianuais. Isso está alinhado ao procedimento deste estudo, em que a estrutura de MRV parte da obtenção ou cálculo de inventários nacionais.

Conforme resultados da revisão documental complementar (Seção 3.4), a literatura aponta para a elaboração de indicadores a partir da relação entre as variáveis de emissões, energia, atividade e macroeconômicas. Nesse caso, a revisão aponta para os indicadores agregados de energia e emissão (por exemplo, consumo energético e emissões atmosféricas), intensidade (energética e de carbono) e de atividade de transporte (passageiros e carga). Notadamente, ao aplicar o procedimento exposto neste Capítulo 4, Seção 4.1, para estimativa nacional emissões atmosféricas e uso de energia, pode-se obter essas variáveis de forma consistente. Outrossim, necessita-se coletar dados socioeconômicos de instituições de referência, como PIB, PIB *per capita*, população etc.

Após a seleção dos indicadores e coleta dos dados necessários, define-se a frequência de monitoramento. É esperado que essa frequência seja anual, conforme os principais relatórios de referência no escopo. Após essa etapa, é desenvolvido o plano de monitoramento, envolvendo a atribuição de responsabilidades e protocolos gerais para a manutenção e retroalimentação do sistema. É uma boa prática que haja a participação de diversos atores no processo. Isso é necessário para desenvolver uma estrutura de MRV abrangente e reduzir a existência de viés (por exemplo, ao dar ênfase exclusiva a um modo de transporte, instituição ou indústria como biocombustíveis e eletromobilidade).

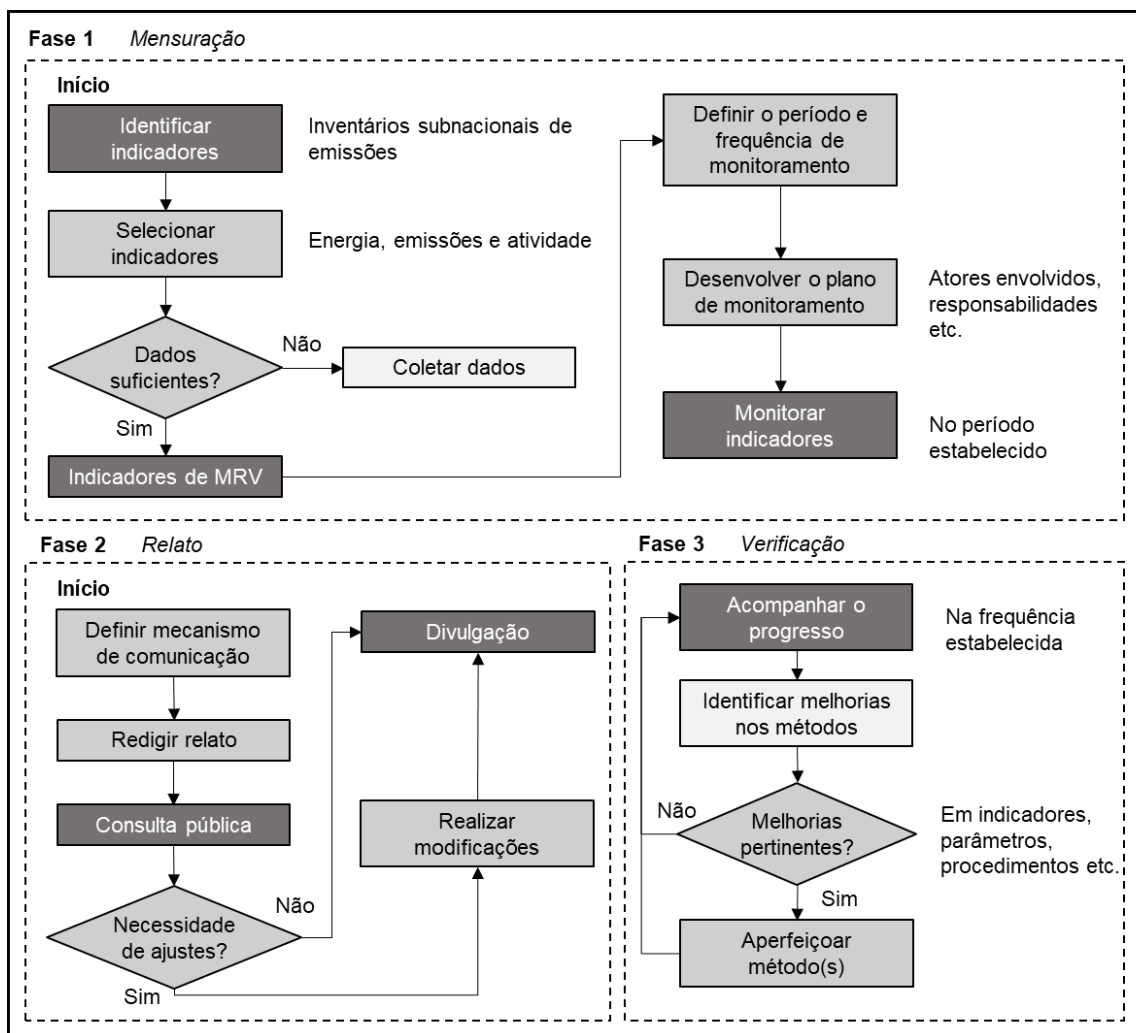
A atividade de relato para as partes não-Anexo I pode ser baseada nas comunicações nacionais e estimativas bianuais (todas envolvendo o desenvolvimento de um inventário nacional de emissões). A diferença entre comunicações nacionais e estimativas bianuais decorre, principalmente, da periodicidade, sendo as comunicações relatadas a cada quatro anos e as estimativas a cada dois anos. Todavia, outros mecanismos de relato podem ser adotados, por exemplo, inventários estaduais de energia ou emissões, relatórios governamentais e de institutos de pesquisa.

Após definir o mecanismo de comunicação, o relato é elaborado e enviado para consulta pública. Eventuais ajustes são modificados antes da publicação da versão final do relato. Para os países-membro da UNFCCC, o relato por ser conduzido por meio das estimativas bianuais de emissões (UNFCCC, 2014).

Por fim, a atividade de verificação é conduzida por meio da avaliação do progresso, por meio dos relatos periódicos. Os países não-Anexo I possuem autonomia para definir mecanismos de verificação próprios. Todavia, as estimativas bianuais podem

ser verificadas pelo processo de Consulta e Análise Internacional (ICA), estabelecido na Conferência das Partes – COP 16 (decisão 1/CP.16) (UNFCCC, 2014). As comunicações nacionais não estão sujeitas à ICA. Em síntese, a ICA envolve uma análise técnica dos dados e uma oficina para compartilhamento de impressões (*workshop* com especialistas do setor). Neste estudo, propõe-se que a verificação seja conduzida anualmente em relação ao progresso dos indicadores selecionados, cujos processos são periodicamente revisados para incorporar melhorias. A depender da melhoria, séries históricas podem ser recalculadas e relatadas em edições mais recentes.

A Figura 4.3 ilustra a estrutura de MRV desenvolvida neste estudo.



Fonte: autor.

Figura 4.3. Estrutura de MRV aplicada a inventários desagregados

Com esses dados, é possível aplicar estruturas de MRV relacionadas aos escopos Emissões e Ações de Mitigação. Conforme visto na Seção 2.4 e ratificada nas seções 3.3

e 3.4, as abordagens mais detalhadas (por exemplo, bottom-up) permitem um tratamento de variáveis mais amplo, o que pode facilitar a adoção de indicadores de MRV mais precisos, sobretudo os relacionados com intensidade e atividade.

4.4 Fase 4: Desagregação espacial tier 1

A Fase 4 se inicia após a estimativa do consumo energético nacional e da atividade de transporte por modo de transporte e tipo (pass-km e t-km), conduzida por meio de inventários nacionais existentes ou de forma independente.

Conforme visto no Capítulo 3, o consumo energético é, após a variável genérica de população, a variável *proxy* mais recomendada pelos autores para a desagregação espacial das emissões. Nessa linha, defende-se que essa variável seja a base do procedimento de desagregação espacial para os *tiers* 2 e 3, dada a relação fundamental entre emissões desses gases atmosféricos e o seu uso de energia. É recomendado coletar dados desagregados de atividade, sobretudo dos modos não rodoviário, por exemplo, movimentação aeroportuária e rede de transporte ferroviária e dutoviária, como forma de guiar a desagregação do consumo energético.

Assim, deve-se verificar a existência de balanços energéticos ou dados de venda ou consumo de combustíveis locais e por modo de transporte. O intuito dessa atividade metodológica é produzir informações de consumo energético desagregado por modo de transporte e entidade subnacional.

A avaliação da consistência dessa atividade é baseada no somatório do consumo energético de cada balanço ou dados locais de venda ou consumo por fonte de energia. Caso o somatório das informações energéticas descentralizadas por modo e entidade subnacional seja próximo do estimado para o país (inventário nacional), considera-se essas estimativas consistentes. Todavia, caso haja divergências, deve-se identificar a causa do problema.

Nessa linha, é possível que haja parte do volume do setor de indústria, geração ou AFOLU alocado no consumo energético de fontes abrangentes como o Diesel, que também é consumido em geradores, equipamentos industriais, máquinas agrícolas etc. Outra possibilidade reside em eventuais duplas contagens de energia consumida entre entidades subnacionais, sobretudo em modos de transporte interestaduais como redes ferroviárias. Por sua vez, caso sejam considerados os dados locais de vendas, é possível

haver divergências em decorrência de o combustível vendido em um ano ser consumido apenas em anos subsequentes (por razão de formação de estoques, demanda abaixo do esperado pelo distribuidor etc.). Por fim, verifica-se se a intensidade energética (kJ/pass-km ou kJ/t-km) obtida na desagregação é condizente com valores de referência da literatura.

O exercício de identificação e ajuste do erro requer, portanto, conhecimento específico do problema por parte do pesquisador ou consulta a especialistas. Em virtude da pouca quantidade de artigos e relatórios com esse objetivo, é esperado que não haja um referencial sobre a divergência considerada aceitável entre o somatório das estimativas desagregadas com o estimado para o país. Para esse caso, recomenda-se a consulta a especialistas do setor, indicando o erro referencial plausível.

Caso não haja informações de consumo energético por entidade subnacional modo de transporte, pode-se conduzir inventários locais a partir das abordagens *bottom-up*, de referência e ASIF mencionadas anteriormente. Essa atividade deve ser realizada preferencialmente nos estados mais populosos, extrapolando os resultados para os demais com base nas variáveis *proxy* identificadas na pesquisa sistemática do Capítulo 3.

Após a avaliação da consistência das estimativas, desagrega-se a energia em entidades subnacionais. Por conseguinte, aplicando FEs *tier 1*, baseados no consumo energético, tem-se as emissões desagregadas por entidade subnacional. Uma prática recomendada se baseia em, caso haja, coletar inventários locais de emissões, comparando-os com a estimativa desagregada. Caso o inventário local seja realizado por uma instituição de referência, que siga boas práticas de modelagem, recomenda-se ajustar o erro da estimativa desagregada com base no inventário local.

Concomitantemente à desagregação das emissões, é possível calcular os indicadores de MRV desagregados. Na existência de coleta preliminar de dados de atividade, haverá dados para calcular indicadores de MRV mais detalhados. Caso contrário, os indicadores deverão ser relacionados apenas com variáveis de energia e emissões. O produto da Fase 4 são as emissões atmosféricas e os indicadores de MRV desagregados espacialmente.

4.5 Fase 5: Desagregação espacial *tiers 2 e 3*

Para desagregar estimativas *tiers 2 e 3*, consideram-se variáveis de atividade para regionalizar as fontes emissoras móveis, recalculando suas emissões. É recomendado utilizar pelo menos duas variáveis *proxy* independentes no processo. Assim, formula-se uma atividade de dupla verificação das estimativas desagregadas por entidade subnacional. A escolha da variável *proxy* requer a caracterização do modo de transporte analisado. No caso do transporte rodoviário, o método recomenda a desagregação da frota circulante nacional, utilizando variáveis *proxy* correlatas (por exemplo, licenciamentos de veículos, ou base de frota da SENATRAN).

À semelhança da Fase 4, somam-se os dados desagregados espacialmente, verificando se o resultado está próximo ao calculado no inventário nacional de emissões atmosféricas. Caso esteja na mesma unidade de grandeza, considera-se as estimativas consistentes. Se o somatório dos resultados desagregados diferirem significativamente do nacional, deve-se identificar outra variável *proxy* para refinar as estimativas. Novamente, é importante estabelecer um erro referencial plausível entre as emissões desagregadas espacialmente e o volume calculado no inventário nacional, seja por meio de indicação da literatura ou por especialistas do setor.

Após a desagregação das fontes móveis, recalculam-se as emissões usando dados locais ou nacional de intensidade de uso/movimentação de veículos automotores, aeronaves, locomotivas etc., aplicando os passos descritos na seção 4.1 e fatores de emissão baseados em variações tecnológicas. Em seguida, verifica-se se há inventários locais de emissões atmosféricas de instituições de referência, como forma de refinar as estimativas. Caso haja erro significativo, deve-se ajustar as estimativas desagregadas para que coincidam com os inventários locais. Por consequência destas atividades, torna-se viável estimar localmente os indicadores de MRV estabelecidos para o país no escopo de Emissões.

Em resumo, os produtos da Fase 5 são: (i) as emissões atmosféricas desagregadas por entidade subnacional, para cada modo de transporte; e (ii) as estruturas de MRV desagregadas por entidade subnacional, para cada modo de transporte. A Seção 4.6 discorre sobre as considerações do Capítulo 4 e os próximos passos para a aplicação do procedimento.

4.6 Considerações do Capítulo 4

O Capítulo 4 descreveu o procedimento desenvolvido para a desagregação espacial do uso de energia e das emissões atmosféricas em entidades subnacionais, atribuindo indicadores locais de MRV. Para isso, considerou-se os resultados das revisões conduzidas nos capítulos 2 e 3, sobretudo na identificação da lacuna científica em métodos de desagregação espacial, quanto à: (1) abordagem metodológica; (2) nível de detalhes (*tier*); (3) gases inventariados; (4) variáveis *proxy*; (5) avaliação de consistência etc.

O resultado é um procedimento detalhado para desagregação espacial em entidades subnacionais que contempla etapas distintas de verificação dos resultados preliminares e análise de consistência. O método pode ser aplicado em qualquer país ou região, uma vez que considera diferentes níveis de maturidade de dados. O procedimento permite tanto a utilização de inventários nacionais existentes quanto o cálculo independente de uso de energia e emissões atmosféricas, caso não exista estimativas consistentes no país. Ao final, produz-se subsídios suficientes para estimar indicadores de MRV por tipo de atividade, modo de transporte e entidade subnacional.

Os resultados da pesquisa sistemática realizada no Capítulo 3 apontam para a utilização de variáveis *proxy* de PIB, população, atividade e energia como forma de desagregar espacialmente as emissões atmosféricas de inventários nacionais. Ratificando esses estudos, o método desenvolvido incorpora tais variáveis para diferentes propósitos ao empregar variáveis econômicas, demográficas e de energia na desagregação de estimativas *tier* 1 e inserir variáveis de atividade para estimativas *tiers* 2 e 3.

Salienta-se que a versão preliminar do procedimento foi discutida e ratificada com especialistas do setor de transportes, especificamente: representantes de grandes empresas, Governo Federal e Estadual, academia e sociedade civil. O evento e os resultados são descritos no Apêndice A. As próximas atividades da pesquisa, descritas no Capítulo 5, envolvem a validação do procedimento desenvolvido por meio de um experimento conduzido no Brasil.

Para que se produza os resultados mais detalhados possíveis, tendo controle sobre as variáveis estimadas, opta-se por inventariar as emissões nacionais de forma independente, aplicando o procedimento descrito no estudo de Gonçalves *et al.*, (2019a).

5. Experimento

Este capítulo apresenta a condução do experimento e a discussão sobre resultados. Assim, o processo de coleta de dados para o inventário nacional de emissões atmosféricas e uso de energia é descrito, bem como para a desagregação espacial e cálculo dos indicadores de MRV. Ressalta-se que o método pode ser empregado em qualquer país ou região devido a sua estrutura de múltiplos níveis de detalhamento de dados.

Conforme exposto anteriormente, apesar de este estudo investigar a desagregação espacial, optou-se por modelar também o inventário nacional do setor de transportes, haja vista a possibilidade do maior controle sobre as variáveis endógenas do modelo. É comum que os relatórios de estudos que modelam inventários nacionais não detalhem informações que podem ser cruciais para a estimativa de indicadores de MRV, como alguns dados aprofundados de emissões e atividade por ano-modelo de veículo. Portanto, modelar todo o fenômeno de ponta a ponta, considerando a maior quantidade de abordagens diferentes, garante o aproveitamento completo do potencial do método desenvolvido, considerando a atual disponibilidade de dados.

É oportuno salientar que a depender do gás modelado, há incertezas diferentes associadas à desagregação espacial. Isso se deve à natureza do gás, como mencionado nas seções 3.2.1 e 3.3.2, a estimativa das emissões de CO₂ é conduzida diretamente em função da energia consumida, pois o FE do CO₂ leva em conta o conteúdo de carbono do combustível). Assim, é mais simples desagregar esse gás em relação a gases cuja emissão depende de variações tecnológicas. Apesar de serem modelados dados entre 1957 e 2021, optou-se por padronizar os gráficos e tabelas para o ano base da NDC brasileira (2005).

5.1 Material base

No Brasil, não existem registros nacionais de licenciamento de veículos bem estruturados que forneçam informações sobre as contagens de veículos por ano-modelo que estão de fato em circulação. A Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), por exemplo, fornece o indicativo da frota nacional por ano-modelo, unidade federativa e município, mas não abate os veículos ao longo do tempo. Assim, a base de dados aponta apenas a frota acumulada ao longo da série temporal do registro. Todavia, essa base de

dados pode ser interessante como direcionador no processo de alocação da frota nacional para as entidades subnacionais.

Ademais, não há dados oficiais sobre a atividade anual por modo de transporte. Assim, para garantir a consistência dos resultados, as entradas com maiores incertezas são estimadas por funções que consideram dados desagregados de instituições independentes (toneladas transportadas por modo de transporte, ocupação e lotação média de veículos, licenciamentos de veículos por ano-modelo etc.).

Os dados nacionais disponíveis para transporte ferroviário, aquático (cabotagem e navegação interior), dutoviário e aéreo não são detalhados o suficiente para usar uma abordagem *bottom-up*. Por esse motivo, as emissões desses modos de transporte são estimadas considerando o uso de energia por fonte e FE *default* baseados no consumo. Em outras palavras, considera-se a abordagem *top-down tier 1* em conjunto com a abordagem ASIF. Por outro lado, as emissões do transporte rodoviário são estimadas por meio da adoção da abordagem *bottom-up tier 3* (para gases não-CO₂), *tier 2* (para CO₂) e *tier 1* (GEE diretos) uma vez que dados detalhados de atividade são disponíveis.

A Tabela 5.1 resume os principais dados de entrada necessários para estimar e desagregar o inventário nacional, tendo como coprodutos indicadores de MRV. As informações são organizadas em agregadas e específicas e em emissões, energia e atividade.

Tabela 5.1. Dados de entrada para calcular e desagregar o inventário nacional e prover indicadores de MRV

Descrição	Dados	Unidade	Bases		
Dados macroeconômicos	População nacional e por entidade subnacional	Habitantes	IBGE		
	PIB nacional e por entidade subnacional	R\$	IBGE, ME		
	Valor Bruto de Produção (VBP)	R\$	MAPA		
Dados agregados	Emissões	Emissões totais nacional, por modo e entidade subnacional	Gg	Estimado pelo modelo e inventários locais	
		Intensidade carbono nacional e por modo	kg/t-km ou kg/pass-km	Estimado pelo modelo	
	Energia	Consumo energético nacional, por setor da economia, modo e entidade subnacional	tep, joule, Wh	MME e ANP	
		Intensidade energética nacional e por modo	kJ/t-km, kJ/pass-km	Estimado (rodoviário) e Gonçalves <i>et al.</i> , (2019a) (modos)	
		Frota circulante por ano-modelo e entidade subnacional	Veículo	Estimado (<i>bottom-up</i>), SENATRAN, inventários locais	
		Extensão da infraestrutura por modo e entidade subnacional	km		
		Atividade de transporte por modo e entidade subnacional	t.km, pass-km		
	Atividade	Divisão modal de carga por modo	%	Gonçalves <i>et al.</i> , (2019a), ANAC, ANTT, ANTF, CNT, ANTAQ, MME, NTC	
		Divisão modal de passageiros por modo	%		
		Total de carga transportada por modo e entidade subnacional	t		
	Total de passageiros transportados por modo e entidade subnacional	pass			
Dados específicos	Emissões	Fator de emissão por gás	kg/l, g/km, g/dia, t/TJ	CETESB, IPCC, MMA	
		Fator de emissão implícito por gás	kg/TJ	Estimado pelo modelo	
		GWP por gás	Índice	IPCC	
	Energia	Fator de conversão por fonte energética	tep, joule etc.	MME e ANP	
		Densidade por fonte energética	t/m ³		
		Composição por fonte energética	% da mistura		
		Poder calorífico por fonte energética	kcal/kg		
	Atividade		Licenciamento por ano-modelo e entidade subnacional	Veículo	ANFAVEA, ABRACICLO, FABUS, FENABRAVE, NTU, PNME
			Rendimento energético por ano-modelo	km/l	CETESB, MMA, Gonçalves <i>et al.</i> , (2019b)
			Intensidade de uso por ano-modelo	km/ano	
		Ocupação média por ano-modelo	t/veículo	Gonçalves <i>et al.</i> , (2019a), ANTP	
		Lotação média por ano-modelo	pass/veículo		
	Distância média por viagem por ano-modelo	km/viagem			

Para o caso brasileiro, os rendimentos energéticos para o modo rodoviário advêm das atualizações anuais da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2022) e dos estudos MMA (2014) e Gonçalves *et al.* (2019b). Em relação aos demais modos, o consumo energético anual é obtido nas atualizações do Balanço Energético Nacional (EPE, 2022). Também para os modos não rodoviário, as intensidades energéticas usadas na aplicação da abordagem ASIF são obtidas no estudo Gonçalves *et al.*, (2019a). Informações específicas sobre as propriedades dos combustíveis, necessárias para o cálculo dos FE *tier 2*, para o modo rodoviário, são obtidas com base em anuários do MME e da ANP.

Os FE *tier 1*, para os modos rodoviário, ferroviário, aéreo e aquático, são coletados no estudo IPCC (2006), sendo também usados na abordagem e ASIF. No caso do aéreo, adotou-se também fatores implícitos para os anos que compõem a linha de base da 4^a Comunicação e ANAC (2020), que adota abordagem *tier 3A*, aproximando os resultados. Por sua vez, os FE *tier 2* para o modo rodoviário são estimados por meio de dados coletados das comunicações nacionais (Brasil, 2016; 2020), do inventário rodoviário (MMA, 2014) e do Balanço Energético Nacional (EPE, 2022)²⁹. Os FE *tier 3*, também para o modo rodoviário, são coletados nos estudos Siegl *et al.* (2002), MMA (2014) e CETESB (2022).

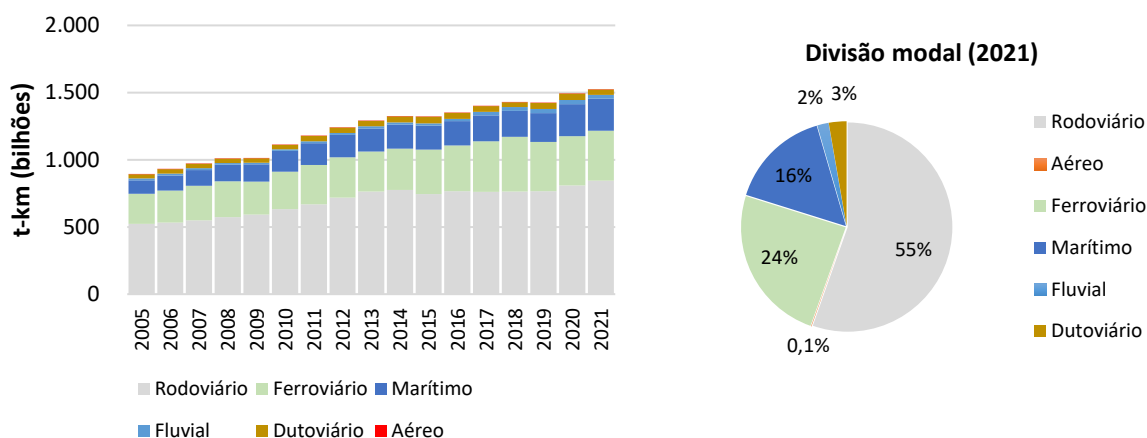
As intensidades de uso de referência, utilizadas na estimativa das emissões do modo rodoviário, são obtidas nos estudos MMA (2014), para leves e pesados (caminhões) e Gonçalves *et al.* (2019b), para pesados de passageiros (ônibus). Os rendimentos energéticos dos veículos automotores são coletados dos estudos MMA (2014), Gonçalves *et al.* (2019b) e CETESB (2022). Os dados são, então, tratados, reduzindo inconsistências, e inseridos nos modelos *bottom-up*, *top-down* e ASIF, seguindo as etapas metodológicas das seções 4.1 e 4.2.

5.2 Inventário nacional

A Figura 5.1 ilustra a linha de base da atividade e a divisão modal do transporte de carga no Brasil, considerando todos os modos. Nota-se que a divisão modal ainda é concentrada no transporte rodoviário, com 55% em 2021, apesar dos esforços nos últimos

²⁹ Para a atualização da densidade energética dos combustíveis.

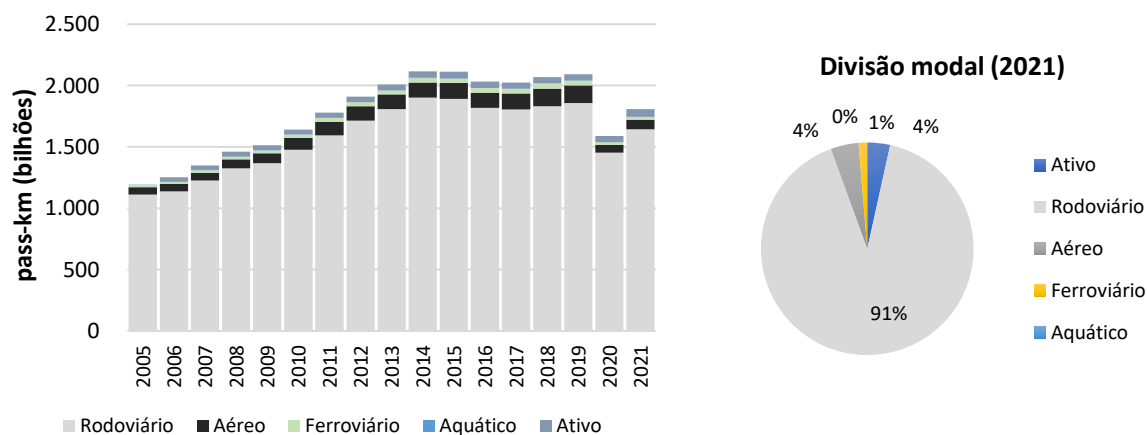
anos em ampliar a oferta e qualificar a infraestrutura ferroviária e aquática³⁰ (era 71% em 1970 e 63% em 2000). Os dados são consolidados a partir da plataforma do Observatório de Sustentabilidade em Mobilidade e Logística (OSML), na qual o modelo desenvolvido nesta tese é um dos alimentadores de dados.



Fonte: OSML (2022)

Figura 5.1. Atividade e divisão modal do transporte de carga

Por sua vez, a Figura 5.2 ilustra a linha de base da atividade e a divisão modal do transporte de passageiros no Brasil, considerando todos os modos.



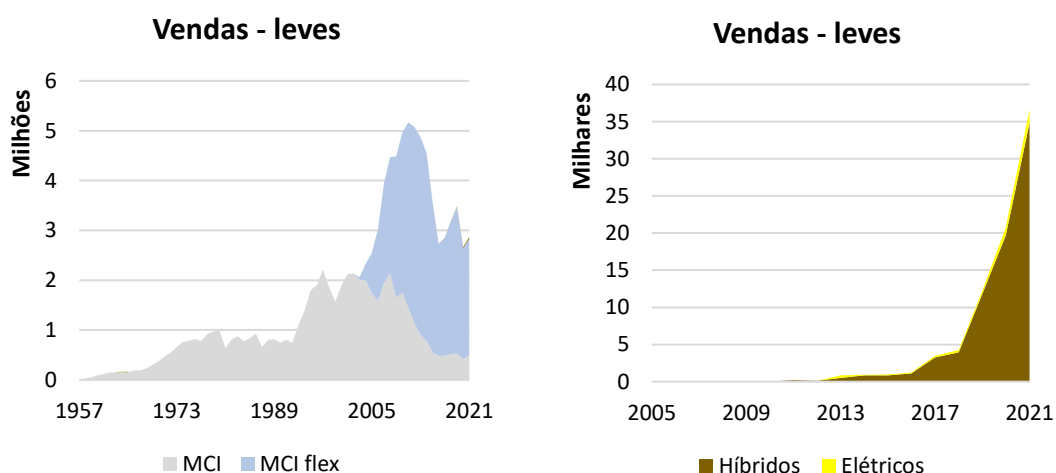
Fonte: OSML (2022)

Figura 5.2. Atividade e divisão modal do transporte de passageiros

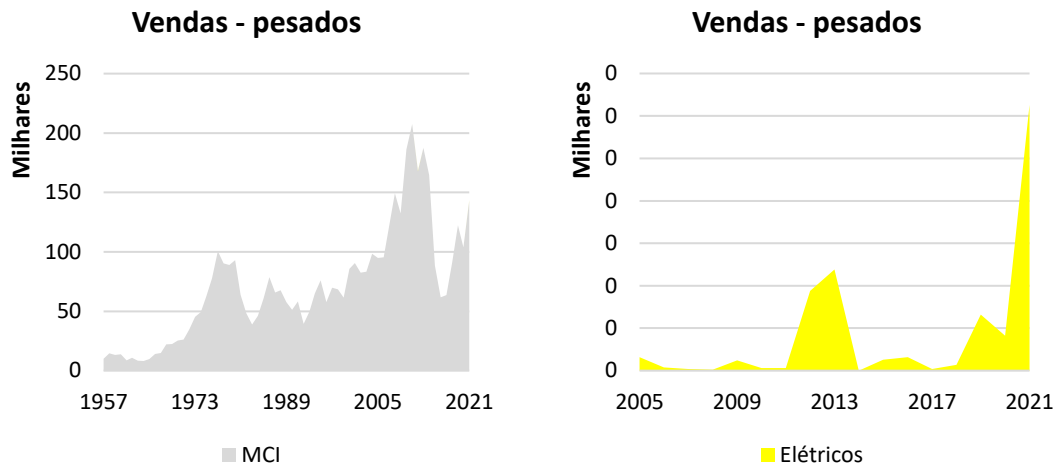
³⁰ Por meio dos Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), Programa Avançar e Programa de Parcerias de Investimentos – PPI.

Historicamente, o transporte de passageiros no Brasil é concentrado no transporte rodoviário, com 91% de participação em 2021. Isso decorre dos altos custos de investimento em transporte sobre trilhos urbano, intermunicipal e interestadual, além da saturação da rede vigente. Por sua vez, o transporte de passageiros pelo modo aquático é significativo em poucas cidades. No Brasil, a atividade desse modo se concentra nos estados do Amazonas e do Rio de Janeiro. O modo aéreo possui mais representatividade que o ferroviário e aquático, todavia, os altos custos operacionais e a alta intensidade energética o mantém como transporte de nicho³¹.

No caso da abordagem *bottom-up tiers 2 e 3*, aplicada no modo rodoviário, há um nível de detalhamento maior quanto aos direcionadores das suas emissões. A Figura 5.3 apresenta a linha de base dos licenciamentos por tecnologia. No caso dos veículos leves (motocicletas, automóveis e comerciais leves), a participação da frota do tipo *flex-fuel* atingiu 81% dos licenciamentos em 2021. No caso dos veículos híbridos não *plug-in* e elétricos (incluindo híbridos *plug-in*), o cenário brasileiro ainda não se aproxima dos principais mercados internacionais, entre 5% e 15% (IEA, 2021), apresentando participações nos licenciamentos restritas a 1,2% e 0,06%, respectivamente.



³¹ Restrito a viagens de média e longa distâncias, sobretudo à trabalho e turismo.



Fonte: autor.

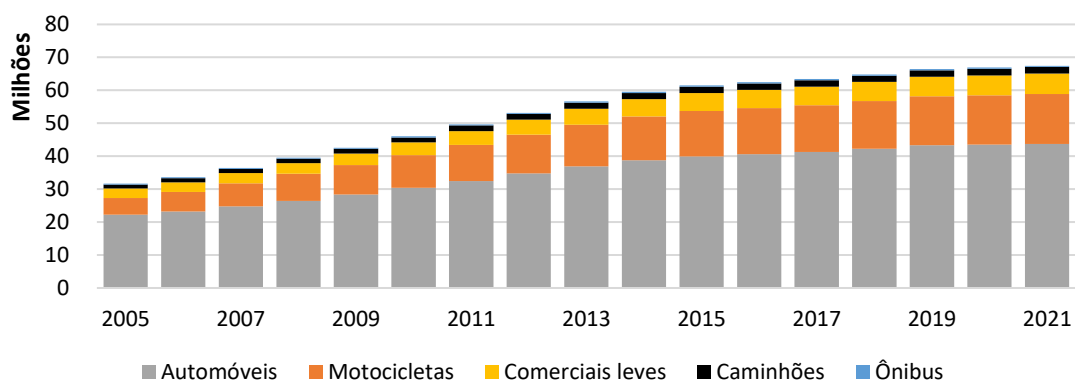
Figura 5.3. Licenciamento de veículos leves e pesados por tecnologia

Por sua vez, a Figura 5.4 mostra a frota circulante por categoria de veículo, considerando o transporte rodoviário. A partir desse ponto, os resultados consideram o intervalo 2005-2021, buscando se debruçar sobre a mesma base da NDC brasileira. Em 2021, a frota brasileira apresentou uma idade média de 10,8 anos para veículos leves, 11,4 anos para veículos pesados de passageiros e 13,1 anos para veículos pesados de carga. Majoritariamente, a frota é composta por automóveis, motocicletas e comerciais leves.

No total, a frota circulante cresceu 113% entre 2005 e 2021, de 31,7 milhões para 67,4 milhões. Especificamente, a categoria de motocicletas teve o maior crescimento (197%), o que pode refletir uma consequência da perda do poder aquisitivo dos brasileiros nos últimos anos, além do incentivo histórico ao transporte individual motorizado³². Em termos de tecnologia, os veículos do tipo *flex-fuel* atingiram 62% de participação na frota de veículos leves de passageiros³³ em 2021. Veículos leves de passageiros híbridos (*plug-in não plug-in*) e elétricos responderam por apenas 0,006% da frota circulante de leves no mesmo ano.

³² Por exemplo, por meio das reduções do Imposto sobre Produtos Industrializados – IPI para veículos leves entre 2008 e 2012 (ANPTRILHOS, 2018).

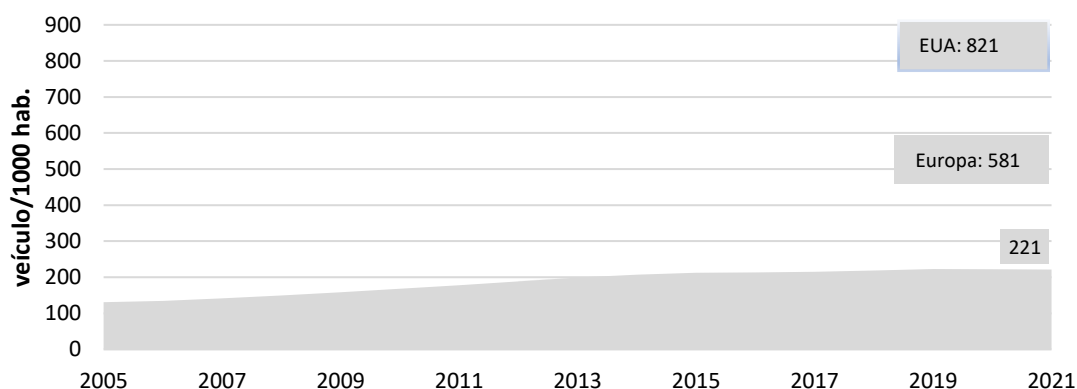
³³ Motocicletas, automóveis e comerciais leves, desconsiderando versões a Diesel.



Fonte: autor.

Figura 5.4. Frota circulante por categoria de veículo

A evolução da taxa de motorização é apresentada na Figura 5.5. Em 2021, o valor de automóveis e comerciais leves (transportando passageiros) manteve a tendência de crescimento, de 131 veículos por mil habitantes em 2005 para 221 veículos por mil habitantes. Esse valor ainda é consideravelmente inferior aos valores de 2016 dos Estados Unidos e Europa.

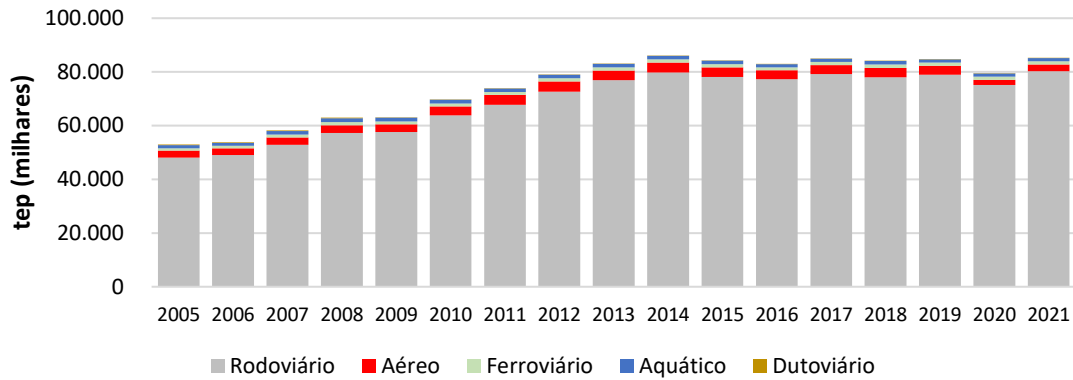


Fonte: autor (Brasil); OICA (2016) (Europa e EUA).

Figura 5.5. Taxa de motorização no Brasil

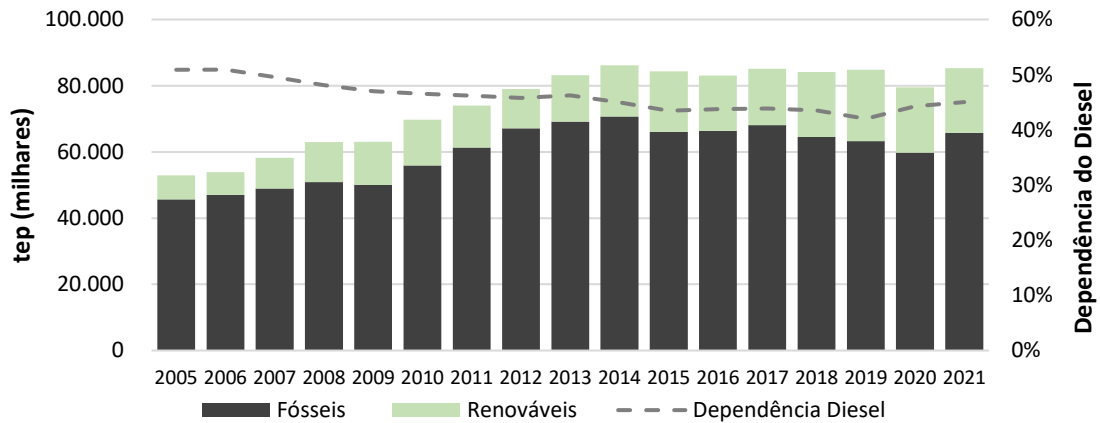
Os padrões de atividade de transporte moldam o uso de energia do setor. Por exemplo, o uso intenso do transporte rodoviário, por ser altamente dependente de combustíveis líquidos, especialmente os fósseis, induz a um consumo maior de diesel e gasolina C. Do mesmo modo, o transporte ferroviário de passageiros, virtualmente

elétrico³⁴, direciona o uso de energia do setor para a eletricidade. A Figura 5.6 ilustra a linha de base do uso de energia pelo setor de transportes no Brasil, enquanto as figuras 5.7, 5.8 e 5.9 estratificam o uso de energia por fonte e tipos de atividade.



Fonte: autor.

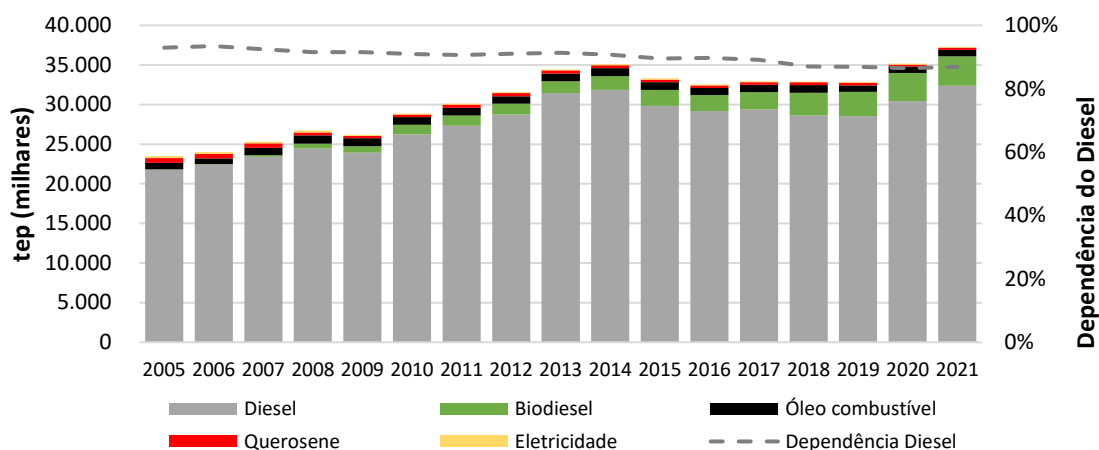
Figura 5.6. Uso de energia no setor de transportes



Fonte: autor.

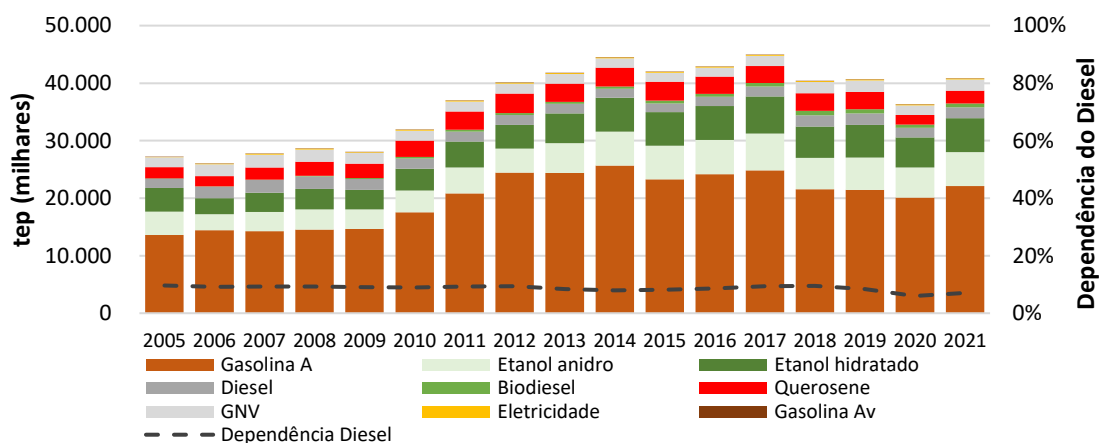
Figura 5.7. Uso de energia por fonte

³⁴ Por redução de custos, alguns Veículos Leves sobre Trilho (VLT) são movidos à diesel (como os casos de Fortaleza e Teresina).



Fonte: autor.

Figura 5.8. Histórico do uso de energia no transporte de carga

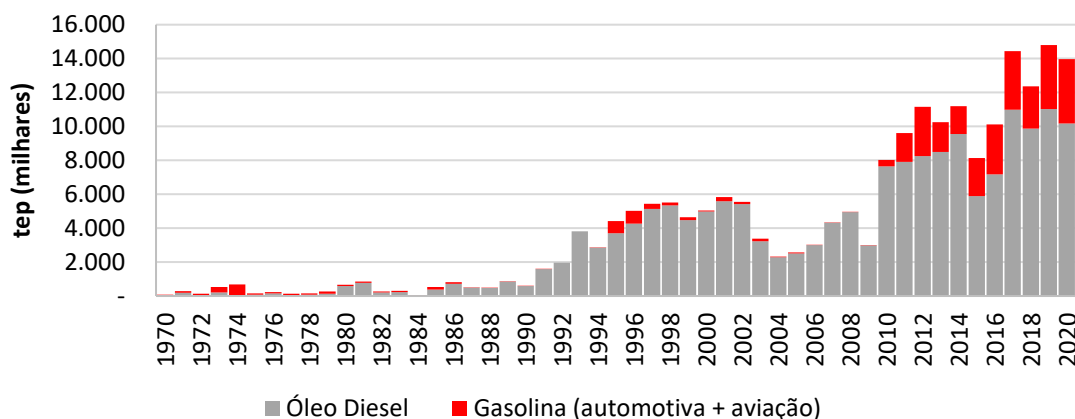


Fonte: autor.

Figura 5.9. Uso de energia no transporte de passageiros

Apesar do recente avanço, de 51% em 2005 para 45% em 2021, o desbalanceamento da divisão modal de carga e a adoção de tecnologias fósseis ainda são causas uma alta dependência do diesel. Não obstante o aumento das misturas regulamentadas de biodiesel com diesel mineral e etanol anidro com gasolina³⁵, além do aumento do consumo de etanol hidratado, ainda há necessidade de produção e, inclusive, da importação de diesel mineral e de gasolina (Figura 5.10). Isso é especialmente preocupante dado o histórico de greves de caminhoneiros no Brasil, que, por exemplo, impactou severamente a atividade de carga em 2018, com escassez de alimentos, suprimentos médicos e combustíveis (DANTAS *et al.*, 2019).

³⁵ Desde 2015, o percentual de etanol anidro na gasolina C se mantém em 25%.

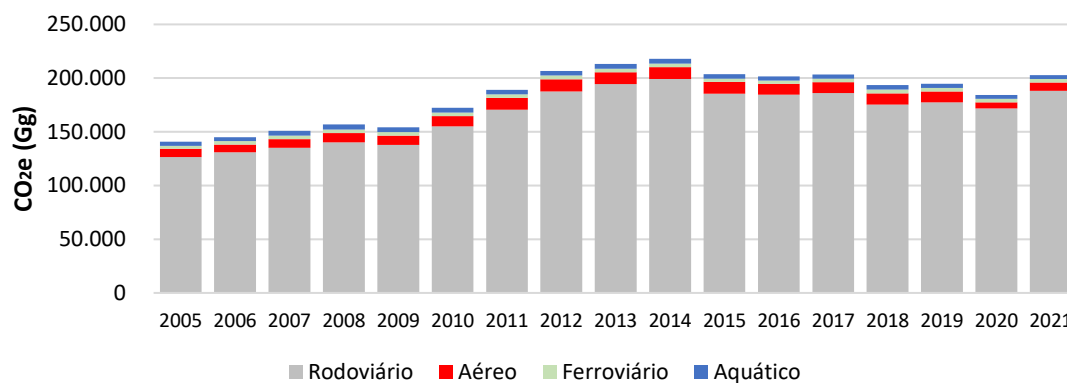


Fonte: EPE (2022).

Figura 5.10. Importação de diesel mineral e gasolina no Brasil

O consumo energético de fontes móveis, por conseguinte, ocasiona as emissões de GEE e poluentes atmosféricos. A Figura 5.11 ilustra as emissões de GEE diretos por modo, incluindo o HFC 134a emitido do ar-condicionado presente nos veículos rodoviários automotores (seja decorrente das emissões fugitivas ou do sucateamento do veículo). Para converter os gases HFC 134a, CH₄ e N₂O em CO₂, foram considerados os fatores GWP presentes no AR6 (IPCC, 2021), apresentados na Tabela 2.2.

Salienta-se que, por consumir eletricidade, os modos dutoviário e ferroviário de passageiros, além da mobilidade elétrica no rodoviário, são enquadrados como emissão zero no uso final, embora haja emissões nas atividades associadas à produção e transmissão da energia. Com base nos resultados, tem-se que o ponto de inflexão observado no ano de 2014 decorre da crise economia e queda da atividade do setor que sucedeu o *impeachment* do chefe do poder executivo. Tal efeito foi potencializado em 2020 com a pandemia de COVID-19, reduzindo novamente o ritmo da recuperação economia, impactando na atividade de transporte, consequentemente no consumo energético e nas emissões atmosféricas.

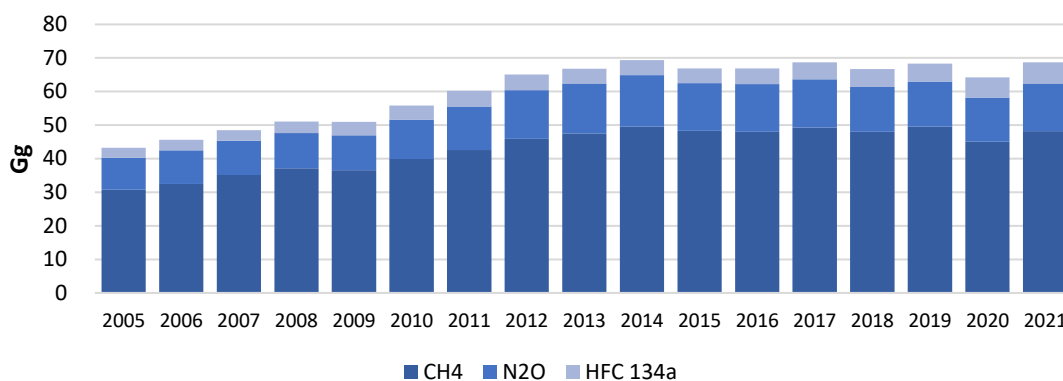


Fonte: autor.

Figura 5.11. Emissões de GEE diretos do setor de transportes

Para aprofundar a análise dos GEE diretos, a Figura 5.12 ilustra as emissões dos gases CH₄, N₂O e HFC 134a (gases não-CO₂). Apesar de o volume emitido de HFC 134a ser reduzido, comparado ao CH₄ e N₂O, o seu fator GWP é 1300 (AR5³⁶), substancialmente maior que os demais. Apenas este gás gera um acréscimo nas emissões totais de CO₂e em cerca de 4%, sendo também emitido por veículos elétricos e híbridos, o que contrapõe o entendimento de serem veículos de zero emissão no uso final da energia.

³⁶ O índice GWP do gás HFC revisado no AR6 ainda não está disponível até a data de publicação deste estudo.



Fonte: autor.

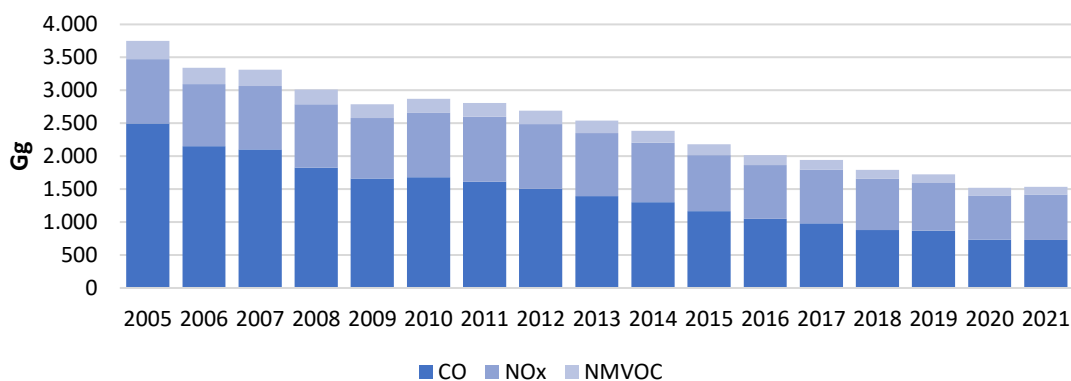
Figura 5.12. Emissões dos GEE diretos CH₄, N₂O e HFC 134a

As emissões desses gases também são diretamente relacionadas ao nível de atividade e consumo energético do setor. Contudo, além desses fatores, tais emissões também sofrem influência do aperfeiçoamento tecnológico de novas gerações de veículos, aeronaves, locomotivas etc.

Neste estudo, os efeitos das variações tecnológicas são sentidos no transporte rodoviário, por exemplo, por meio do avanço das fases do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT), Rota 2030 e programas de sustentabilidade e reconhecimento (como o Programa de Logística Verde Brasil – PLVB). O efeito destes programas é sentido, sobretudo, nas emissões de poluentes atmosféricos e alguns GEE indiretos (por exemplo, CO e NO_x), com o advento da fase L3 do PROCONVE, caracterizada pela obrigatoriedade de equipar os catalisadores de três vias (BRASIL, 2014).

O gás CH₄ apresenta níveis de emissões por unidade de veículo cada vez menores, devido à melhoria da tecnologia e penetração dos veículos equipados com catalisadores de três vias. Não obstante, há indícios que esses veículos emitem mais N₂O em relação aos veículos que não dispõem desta tecnologia (BRASIL, 2014). Isso ajuda a justificar o histórico de aumento deste gás na medida que aumenta a penetração de veículos das fases mais avançadas do PROCONVE na frota circulante.

A Figura 5.13 apresenta as emissões dos GEE indiretos CO, NO_x e NMVOC no transporte rodoviário.

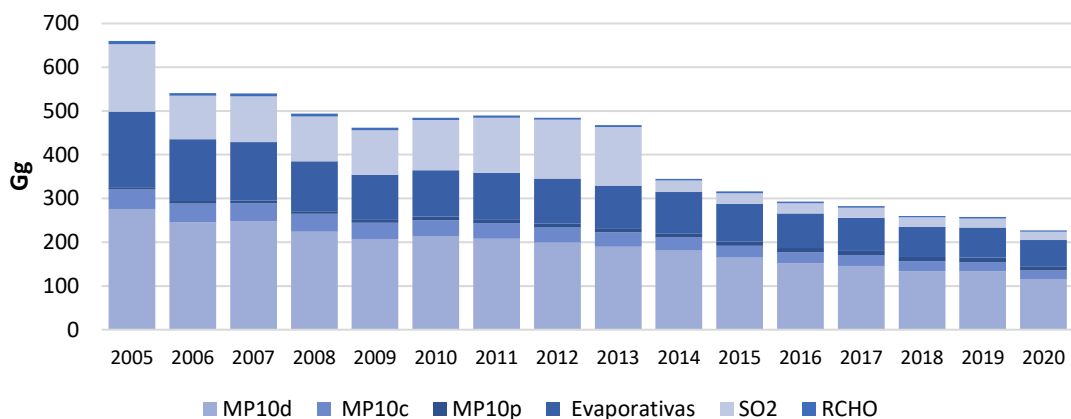


Fonte: autor.

Figura 5.13. Emissões de GEE indiretos do transporte rodoviário

Ressalta-se que não estão disponíveis para os demais modos de transporte fatores de emissão locais por tecnologia (*tier 3*), impossibilitando o cálculo de GEE indiretos e poluentes atmosféricos no mesmo nível do transporte rodoviário. Conforme exposto na figura, as emissões de CO, NO_x e NMVOC reduzem significativamente ao longo da série temporal. Novamente, isso ocorre devido à penetração de veículos fabricados em fases mais avançadas do PROCONVE e PROMOT na frota circulante, especialmente a partir da fase L3.

Finalmente, a Figura 5.14 ilustra as emissões dos poluentes atmosféricos MP10d (desgastes de pneus e freios), MP10c (combustão), MP10p (desgaste de pista), SO₂, RCHO e evaporativas.



Fonte: autor.

Figura 5.14. Emissões de poluentes atmosféricos do transporte rodoviário

As emissões evaporativas despencam com o maior controle sobre a tecnologia de fabricação dos veículos. O mesmo ocorre para o RCHO, todavia, este gás tem relevância na queima de etanol, tendo um maior volume emitido com a penetração de veículos dedicados a etanol na década de 1980. Com o advento dos veículos do tipo *flex-fuel* e o aumento da fatia de mercado de etanol hidratado, houve um pequeno aumento em 2004, sendo reduzido nos anos seguintes devido ao controle mais restritivo para automóveis e veículos comerciais leves equipados com motores do ciclo Otto.

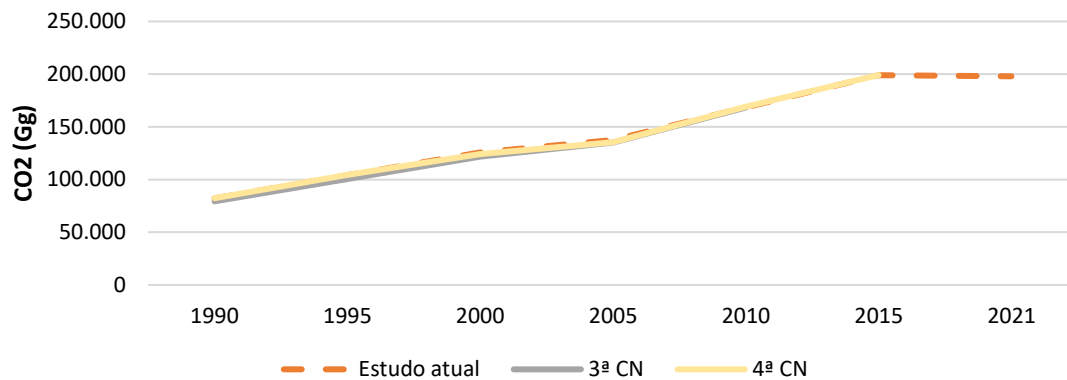
Pelo mesmo motivo, as emissões de MP10 oriundas da combustão foram reduzidas significativamente, sobretudo a partir da fase P4 do PROCONVE. Nessa linha, 95% das emissões de 2021 vieram de veículos equipados com motores do ciclo diesel (comerciais leves, ônibus e caminhões). Na outra vertente, as emissões de MP10d e MP10p variam conforme o nível de atividade do setor, sendo diretamente proporcional ao aumento da intensidade de uso dos veículos. Nesse caso, as emissões aumentaram 74% e 83% entre 2005 e 2021, respectivamente.

Assim como no caso do HFC 134a, estudar a mitigação das emissões destes dois poluentes é um importante campo de pesquisa para os próximos anos, uma vez que os veículos elétricos e híbridos também emitem esses gases. Isso contribui para o aumento da concentração desses poluentes, principalmente em centros urbanos, além das emissões do importante GEE HFC. Por último, as emissões de SO₂ reduzem na medida em que avança a frota circulante de veículos da fase P7 do PROCONVE, que exigiu novos sistemas de pós-tratamento dos gases de escapamento e uso de Diesel com baixo teor de enxofre (S50³⁷ em 2012 e S10³⁸ em 2013, em detrimento dos S500 e S1.800).

A consistência dos resultados foi avaliada por meio da comparação dos resultados estimados neste estudo com os resultados das 3^a e 4^a Comunicações Nacionais (BRASIL 2016, 2020), do 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2014) e de estudos de referência. Devido ao avanço metodológico empregado no presente estudo, os relatórios de referência selecionados não englobam todos os gases modelados, por exemplo, HFC 134a ou poluentes atmosféricos. O resultado da avaliação quanto ao volume emitido por gás é ilustrado nas figuras 5.15 e 5.16.

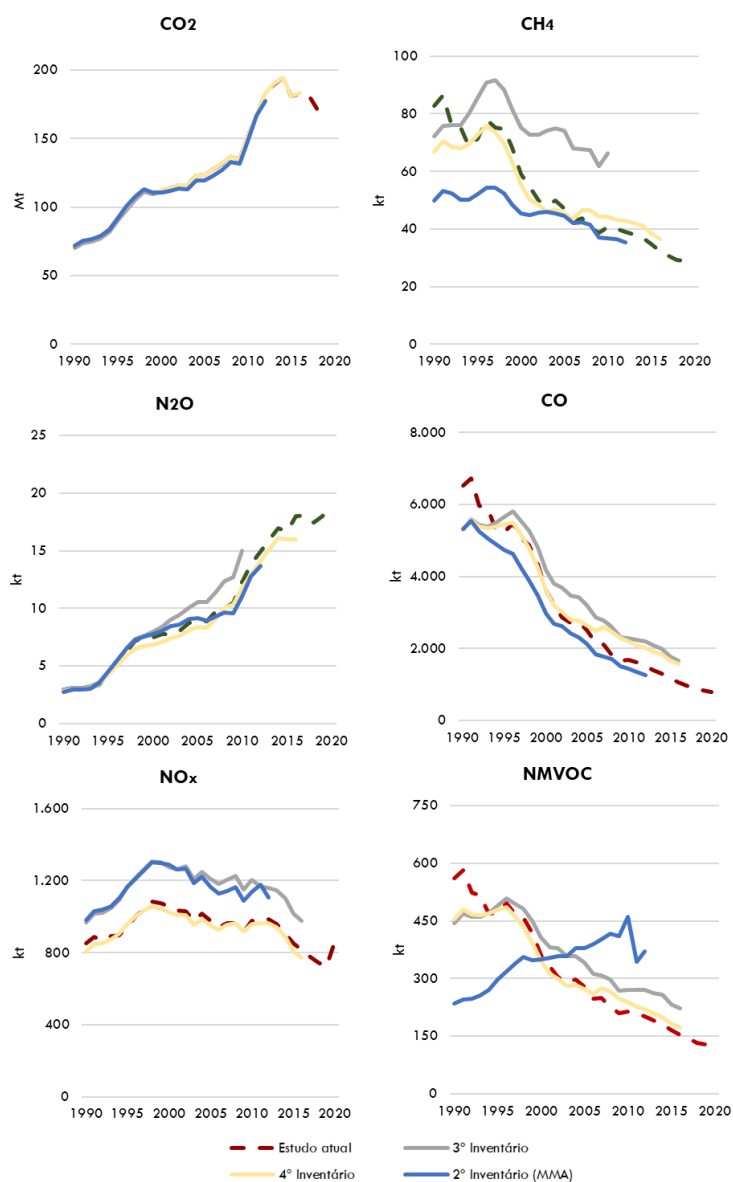
³⁷ 50 partes por milhão (ppm).

³⁸ 10 partes por milhão (ppm).



Fonte: autor.

Figura 5.15. Comparação do volume de CO₂ emitido pelo setor de transportes



Fonte: autor.

Figura 5.16. Comparação do volume emitido pelo transporte rodoviário

Como as emissões de CO₂ são diretamente relacionadas ao consumo energético nacional, não são esperadas variações significativas entre as estimativas, salvo após atualizações do consumo histórico do BEN ou dos fatores de emissão *tiers* 1 e 2. Para englobar mais gases e estudos, foi necessário comparar apenas os resultados do modo rodoviário, por ser o único modo com fatores de emissão locais desagregados por tecnologia.

As figuras apontam para uma convergência dos resultados dos diferentes trabalhos, especialmente entre a 4ª Comunicação Nacional e o presente estudo. É importante reforçar que ambos consideram o mesmo modelo, mas com pequenos aperfeiçoamentos aplicados no estudo atual, tanto metodológicos como de atualização dos fatores de emissão e consumo energético.

Ademais, a Tabela 5.2 apresenta a intensidade energética estimada neste estudo para cada modo de transporte e tipo de atividade (passageiros e carga). Ressalta-se que poucos trabalhos apresentam os valores de intensidade energética tabulados, sendo necessário, em alguns casos, estimar o valor a partir de dados de consumo energético e atividade. O intuito desta atividade, portanto, é verificar se as intensidades energéticas calculadas estão em linha com intensidades de estudos de referência para os mesmos modos de transporte.

Tabela 5.2. Comparação da intensidade energética média de cada modo de transporte

Indicador	Modo	Brasil	Brasil	EUA	Itália
		Atual	D'Agosto <i>et al.</i> (2016)	Fraser <i>et al.</i> (1995)	Bruno <i>et al.</i> (2015)
Passageiros (kJ/pass-km)	Rodoviário	708	1.061	-	-
	Aéreo	881	1.264	-	-
	Ferrovário	187	219	-	80-630
	Fluvial	2.584	3.184	-	-
Carga (kJ/t-km)	Rodoviário	1.450	1.739	500-5.000	800-3000
	Aéreo	9.274	13.566	-	-
	Ferrovário	104	123	100-260	150-380
	Cabotagem	278	284	-	-
	Navegação interior	843	227	-	-
	Dutoviário	121	121	-	-

Fonte: autor.

Conforme exposto, os valores estimados de intensidade energética do transporte de carga e passageiros, estão próximo dos intervalos apontados pelos estudos selecionados. Essa verificação reduz as incertezas quanto aos resultados, especialmente dos dados locais de atividade, caracterizados pela falta de dados consolidados, sendo frequentemente necessário coletar de múltiplas fontes.

5.2 Desagregação espacial de inventário nacional

Esta seção apresenta a condução do experimento de desagregação espacial do inventário nacional de uso de energia e emissões atmosféricas calculado, com vistas à aplicação de MRV (na próxima seção). O processo é dividido em rotas de cálculo (*tier 1* e *tiers 2 e 3*) e MRV.

A seção 5.2.1 apresenta as desagregações por meio da rota *tier 1*, menos intensivas em coleta e processamento dos dados. No caso das desagregações *tiers 2 e 3* (seção 5.2.2), devido ao intenso consumo de recurso (recalculando emissões por tecnologia por entidade subnacional), optou-se por apresentar apenas no estado de São Paulo. A escolha também foi baseada na existência de um histórico de publicações de inventários estaduais pela CETESB, permitindo a avaliação de consistência da linha de base.

5.2.1 Desagregação espacial tier 1

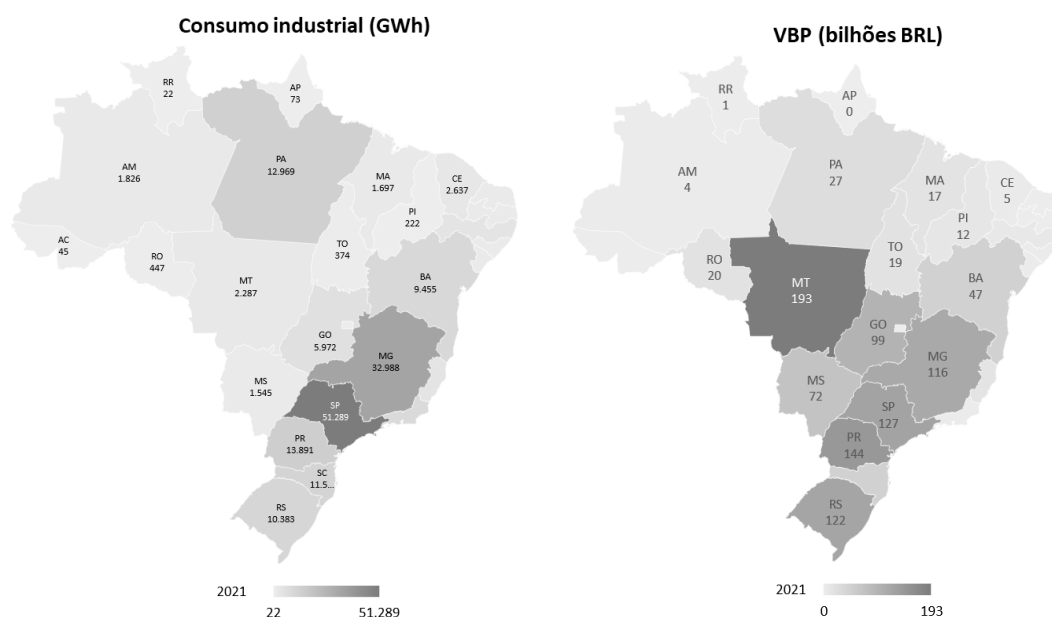
O experimento de desagregação é dividido em processos e iterações de alocação dos setores econômicos, atividade de transporte e consumo de energia, bem como exposição dos resultados e avaliação de consistência.

5.2.1.1 Iterações de alocação

O procedimento desenvolvido se inicia com a identificação das fontes e do montante de energia consumido pelo setor de transportes. Parte das fontes energéticas também é consumida por outros setores da economia brasileira. Como a ANP, que fornece dados de consumo por estado, não discretiza essa informação por setor econômico, é necessário realizar uma desagregação prévia para os principais setores consumidores para cada fonte energética que também é consumida no setor de

transportes. Nesse caso, o BEN fornece o indicativo do consumo energético por fonte e por setor econômico nacional. Tal participação é, então, considerada para remover parte do volume de combustível por estado indicado pela ANP.

Não obstante, o consumo energético de múltiplos setores não ocorre de forma uniforme entre os estados, em decorrência dos seus diferentes perfis econômicos. Por exemplo, o Diesel consumido na agropecuária difere em intensidade quando comparando estados produtores com estados consumidores. O mesmo raciocínio se aplica em estados com alta ou baixa participação da indústria em suas economias. Exemplos dos diferentes perfis econômicos das entidades subnacionais são ilustrados na Figura 5.17, que ilustra, para o ano de 2021, os valores das variáveis *proxy* ‘Valor Bruto de Produção Agropecuária’ (VBP)³⁹ e ‘Consumo Industrial’.



Fonte: autor.

Figura 5.17. Distribuição espacial de variáveis *proxy* para setores econômicos

Isto posto, o procedimento considera matrizes de variáveis *proxy* para abater o volume histórico de combustível consumido em cada estado oriundo de setores econômicos não-transportes. Entende-se que o volume remanescente representa uma aproximação com menor incerteza em relação à situação de se abater apenas a

³⁹ Calculado sobre a produção agrícola e preços recebidos pelos produtores locais.

participação do setor de transportes no BEN uniformemente entre os estados, como realizado, por exemplo, no Inventário de Emissões do Distrito Federal⁴⁰ (SEMA, 2021).

Ademais, no intuito de compatibilizar plenamente o consumo energético do setor de transportes dos estados com o consumo do setor de transportes nacional, adota-se o BEN como referencial para alocação da energia. Assim, o volume energético por estado, fornecido pela ANP, após a remoção dos setores não-transportes, é proporcionalmente ajustado e convertido⁴¹ para equivaler à energia indicada pelo BEN. Esse protocolo evita que os resultados de cada setor e de cada fonte energética não coincidam com o reportado no BEN.

A Tabela 5.3 resume as matrizes *proxies* consideradas para abatimento do consumo energético de setores econômicos não-transportes, considerando suas participações absolutas fornecidas pelo BEN.

Tabela 5.3. Matrizes para abatimento da energia consumida por setores não-transportes

Energia	Setores	Fonte	Matrizes proxy (estados)
Gasolina A	Transportes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BEN (Cap. 2) ▪ ANP 	-
Etanol hidratado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transportes ▪ Agropecuário 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BEN (Cap. 2) ▪ ANP 	-
Etanol anidro	Transportes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BEN (Cap. 2) ▪ ANP 	-
Diesel mineral	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transportes ▪ Agropecuário ▪ Industrial ▪ Energético ▪ Comercial ▪ Público 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BEN (Cap. 2) ▪ ANP 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valor Bruto de Produção Agropecuária (VBP) ▪ Consumo Industrial (EPE) ▪ Geração de Eletricidade por Fonte (EPE) ▪ Consumo Comercial (EPE)
Biodiesel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transportes ▪ Agropecuário ▪ Industrial ▪ Comercial ▪ Público 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BEN (Cap. 2) ▪ ANP 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valor Bruto de Produção Agropecuária (VBP) ▪ Consumo Industrial (EPE) ▪ Geração de Eletricidade por Fonte (EPE) ▪ Consumo Comercial (EPE)
Gás natural	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Industrial ▪ Energético ▪ Transportes ▪ Residencial ▪ Comercial 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BEN (Cap. 2) ▪ ANP 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consumo Industrial (EPE) ▪ Geração de Eletricidade por Fonte (EPE) ▪ Consumo Residencial (EPE) ▪ Consumo Comercial (EPE)
Querosene	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transportes ▪ Residencial ▪ Industrial ▪ Agropecuário 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BEN (Cap. 2) ▪ BEN (Cap. 4) ▪ ANP 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atividade Doméstica (ANAC) ▪ Atividade Internacional (ANAC)
Gasolina de Aviação	Transportes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BEN (Cap. 2) ▪ BEN (Cap. 4) ▪ ANP 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atividade Doméstica (ANAC) ▪ Atividade Internacional (ANAC)

⁴⁰ Apesar de ser um inventário subnacional, esse estudo adota uma abordagem *tier 1* com etapas semelhantes a uma desagregação nacional.

⁴¹ De unidade de volume para unidade de energia.

Energia	Setores	Fonte	Matrizes <i>proxy</i> (estados)
Óleo Combustível	▪ Industrial	▪ BEN (Cap. 2) ▪ BEN (Cap. 4) ▪ ANP	▪ Consumo Industrial (EPE) ▪ Geração de Eletricidade por Fonte (EPE) ▪ Consumo Comercial (EPE)
	▪ Transportes		
	▪ Energético		
	▪ Comercial		
	▪ Público		
	▪ Agropecuário		
Eletricidade	▪ Industrial	▪ BEN (Cap. 2) ▪ ANP	-
	▪ Residencial		
	▪ Comercial		
	▪ Público		
	▪ Agropecuário		
	▪ Energético		
	▪ Transportes		

Fonte: autor.

A coluna ‘Matrizes *proxy*’ indica as variáveis de alocação dos setores organizadas em estados (linha) e anos (coluna). Para reduzir distorções entre os setores, prioriza-se matrizes originárias de uma mesma base de dados, por exemplo, EPE. A coluna ‘Setores’ indica, em ordem de volume, os principais consumidores do combustível indicado. Por sua vez, o abatimento é realizado sequencialmente a partir dos setores com menor nível de incerteza ou menor volume total, visando mitigar o impacto de potencial erro. Na situação em que o setor de transportes possua uma representação mínima no consumo de uma dada fonte energética ou mesmo que a ANP não a reporte por estado, por exemplo, gás natural e eletricidade, considera-se o volume do BEN e se inicia a etapa seguinte⁴² (alocar energia por modo de transporte e entidade subnacional).

Ressalta-se ainda que setores cuja participação seja inferior a 1% da energia total consumida de uma fonte são consolidados em uma categoria denominada ‘Outros’, cuja variável *proxy* é a que representa o setor com maior participação desse grupo. Outrossim, combustíveis como gasolina A, gasolina de aviação e etanol anidro são restritos ao setor de transportes, não demandando abatimento de setores econômicos. Apenas 0,1% do volume de etanol hidratado não é destinado ao setor de transportes, mas ao agropecuário, por esta razão, não há abatimento ponderado entre os estados via *proxy* com o VBP. Dada a representatividade virtualmente nula, o volume é subtraído do BEN igualmente entre os estados.

⁴² A justificativa por esse protocolo reside na alta incerteza associada quando se abate setores de alta representatividade antes de se obter o volume de transportes, pois sobraria um volume muito reduzido para absorver eventuais erros de balanceamento entre estados.

Por fim, ajustes finos são realizados, por exemplo, verificando se o volume alocado de um combustível é compatível com o perfil da indústria, geração ou agropecuária local ou se o volume remanescente, após remover os setores, é suficiente para comportar o perfil de transporte de passageiros e carga do local (caso transportes seja o setor com maior volume do combustível analisado). A condução desses ajustes demanda, preferencialmente, informações e experiência do modelador com modelos multissetoriais.

Combustíveis que apresentem uma alta participação de atividade internacional em relação à doméstica demandam uma etapa adicional de separação do volume de *bunker*, seguindo as diretrizes do IPCC (2006). Esse é o caso, por exemplo, do querosene e da gasolina de aviação que, embora sejam virtualmente consumidos apenas no setor de transportes, possuem uma alta participação de aviação internacional/*bunker*⁴³.

A atividade de separação é recomendada para combustíveis com alta participação de *bunker*. Por exemplo, parte do Diesel abastecido em veículos de carga e passageiros nas regiões de fronteiras não é consumido no Brasil, mas essa participação é irrisória em comparação ao volume doméstico. Diferentemente de países europeus, a característica continental do Brasil, com atividades concentradas na região sudeste, reduz o impacto do transporte em trânsito com países vizinhos. Além disso, não há dados consistentes e detalhados o suficiente que possibilitem a quantificação da atividade rodoviária pertencente a países vizinhos.

A Tabela 5.4 mostra as etapas que representam o abatimento do volume de energia consumido por outros setores e de *bunker*.

Tabela 5.4. Abatimento do volume de energia consumido por outros setores e de *bunker*

1. Abatimento de setores não-transportes	2. Abatimento de <i>bunker</i>
1. Ajustar proporcionalmente o volume do combustível, por entidade subnacional, relatado pela ANP para equivaler ao volume total do combustível relatado no Capítulo 2 do BEN. Tem-se, portanto, uma nova matriz, cujos valores equivalem ao total informado pelo BEN, mas na proporção estadual informada pela ANP	1. Coletar o volume do combustível doméstico (m ³), disponível no Capítulo 2 do BEN, e do <i>bunker</i> (tep), disponível no Capítulo 4 do BEN, convertendo a energia do <i>bunker</i> em unidade de volume
2. Multiplicar os volumes setoriais do BEN, considerando o combustível em análise, pelas matrizes <i>proxies</i> dos setores da economia que consomem este combustível para estimar matrizes de consumo por setor, por entidade subnacional, ao longo do tempo	2. Multiplicar os volumes do BEN pelas matrizes <i>proxies</i> de cada combustível para estimar a proporção entre os volumes de doméstico e <i>bunker</i> de cada entidade subnacional ao longo do tempo

⁴³ No caso da gasolina de aviação, isso era representativo até 2014.

1. Abatimento de setores não-transportes	2. Abatimento de <i>bunker</i>
3. Abater da matriz do BEN (Passo 1) os resultados das matrizes setoriais (Passo 2), seguindo a ordem do setor com menor nível de incerteza ou volume total para o setor com maior nível de incerteza ou volume total	3. Aplicar a proporção estimada sobre o volume indicado pela ANP para cada entidade subnacional. Tem-se, portanto, o consumo do combustível via ANP, em volume, separado entre doméstico e <i>bunker</i> , por entidade subnacional
4. Analisar e ajustar eventuais divergências entre os volumes dos estados. Em outras palavras, o volume total abatido não pode superar o volume total dedicado ao estado (BEN), seguindo a proporção informada pela ANP. Verificar qual setor deve absorver ou ceder volume, comparando com balanços e matrizes energéticas dos estados	4. Ajustar proporcionalmente o resultado para equivaler ao volume indicado pelo BEN. Assim, tem-se o volume do BEN, dividido por entidade subnacional, doméstico e <i>bunker</i> , respeitando a participação de cada estado, no que tange ao consumo do combustível analisado, relatada pela ANP
5. Converter as matrizes setoriais resultantes em unidade de energia	5. Converter as matrizes resultantes em unidade de energia

Fonte: autor.

Após realizar os abatimentos dos setores econômicos e dos volumes de *bunker*, quarenta matrizes de consumo de combustível por setor econômico são geradas. Deste total, as matrizes referentes ao setor de transportes avançam para a próxima etapa metodológica ('alocar energia por modo de transporte e entidade subnacional'). Até este ponto, a energia consumida pelo setor de transportes é segmentada apenas em função da fonte (gasolina A, Diesel mineral etc.). Logo, é necessária a realização de novas iterações de alocação da energia do setor entre os modos de transportes.

A Tabela 5.5 apresenta as matrizes *proxies* consideradas para alocação da energia consumida pelo setor de transportes nos diferentes modos que o constitui.

Tabela 5.5. Matrizes para alocação da energia de do setor de transportes em cada modo

Energia	Modo	Atividade	Subatividade	Matrizes <i>proxy</i> (estados)
Gasolina A	Rodoviário	Passageiros	Transporte individual	Frota acumulada do transporte individual motorizado (SENATRAN)
Etanol hidratado	Rodoviário	Passageiros	Transporte individual	Frota acumulada do transporte individual motorizado (SENATRAN)
Etanol anidro	Rodoviário	Passageiros	Transporte individual	Frota acumulada do transporte individual motorizado (SENATRAN)
Diesel mineral	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rodoviário ▪ Ferroviário ▪ Fluvial 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Passageiros ▪ Carga 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transporte coletivo, distribuição física e transferência ▪ Locomotivas ▪ Navegação interior e barcas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frota acumulada de distribuição física, transferência e coletivo (SENATRAN) ▪ Intensidade de uso por tecnologia (Inventário nacional) ▪ Litros de combustível por tecnologia (Inventário nacional) ▪ Atividade ferroviária (t-km) ▪ Atividade navegação interior (t-km) ▪ Atividade barcas (passageiros)
				<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frota acumulada (SENATRAN) ▪ Intensidade de uso (Inventário nacional) ▪ Litros de combustível por tecnologia (Inventário nacional) ▪ Atividade ferroviária (t-km)
Biodiesel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rodoviário ▪ Ferroviário 	Passageiros	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transporte coletivo, distribuição física e transferência ▪ Locomotivas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frota acumulada (SENATRAN) ▪ Intensidade de uso (Inventário nacional) ▪ Litros de combustível por tecnologia (Inventário nacional) ▪ Atividade ferroviária (t-km)

Energia	Modo	Atividade	Subatividade	Matrizes proxy (estados)
Gás natural	Rodoviário	Passageiros	Transporte individual	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frota acumulada (SENATRAN) ▪ Intensidade de uso (Inventário nacional) ▪ Litros de combustível por tecnologia (Inventário nacional)
Querosene	Aéreo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Passageiros ▪ Carga 	Aviação doméstica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atividade Doméstica (RPK) ▪ Atividade Internacional (RPK)
Gasolina de Aviação	Aéreo	Passageiros	Aviação doméstica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atividade Doméstica (RPK) ▪ Atividade Internacional (RPK)
Óleo Combustível	Cabotagem	Carga	Navegação costeira	Atividade cabotagem (t-km)
Eletricidade	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rodoviário ▪ Ferroviário ▪ Dutoviário 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Passageiros ▪ Carga 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transporte individual ▪ Metrô, VLT e trens metropolitanos ▪ Dutos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frota acumulada do transporte individual motorizado (SENATRAN) ▪ Atividade ferroviária (pass-km) ▪ Malha dutoviária (km)

Fonte: autor.

Assim como nas iterações de alocação do volume de combustível consumido nos setores econômicos, nas quais o perfil das atividades agropecuária, industrial, energética etc. dos estados interfere na proporção da energia consumida, a energia consumida no setor de transportes é consumida espacialmente em intensidades desiguais. Nesse caso, a infraestrutura de transportes, tecnologia empregada e nível de atividade são fatores-chave na identificação da intensidade e do montante consumido de cada fonte energética nos estados.

A coluna ‘subatividades’ representa uma desagregação adicional do transporte rodoviário, não apenas em passageiros e carga. O intuito é estimar a maior quantidade de dados consistentes possível, visando compreender o perfil de mobilidade e o consequente uso de energia e emissões atmosférica das entidades subnacionais, provendo insumos para uma estrutura de MRV. Os dados são oriundos das categorias de veículos dispostas nos relatos de frota acumulada da SENATRAN (2022). Salienta-se que, como a frota da SENATRAN é utilizada apenas no processo de desagregação, em conjunto com outras variáveis descritas em seguida, entende-se que a característica de não sucatear veículos não gera distorções, uma vez que não interferirá no total de energia consumida e nas consequentes emissões atmosféricas⁴⁴. Isto posto, a Tabela 5.6 aponta as categorias de veículos, dispostas pela Senatran, que compõem as subatividades consideradas no presente estudo.

⁴⁴ O que difere da situação não recomendada em que se considera os dados da Senatran como uma representação da frota em circulação, considerando esses valores para inventariar energia e emissões do setor de transportes.

Tabela 5.6. Critérios de enquadramento das subatividades do transporte rodoviário

Subatividade	Categoria SENATRAN
Transporte individual	Automóveis + 60% ⁴⁵ da frota acumulada das categorias ‘caminhonetes’ e ‘camionetas’
Distribuição física	40% ⁴⁶ da frota acumulada das categorias ‘caminhonetes’ e ‘camionetas’ + 35% ⁴⁷ da frota acumulada da categoria ‘caminhões’
Transferência	65% da frota acumulada da categoria ‘caminhões’ + ‘caminhão trator’
Transporte coletivo	Micro-ônibus Ônibus

Fonte: autor.

A coluna ‘Matrizes *proxy*’ indica as variáveis de alocação dos modos de transportes organizadas em estados (linha) e anos (coluna). Prioritariamente, o modelo estrutura as matrizes com dados de atividade de transporte (pass-km e t-km), levantadas individualmente por estado. Advoga-se que a atividade de transporte permite uma melhor aproximação da proporção do consumo de energia entre as entidades subnacionais. Foram estruturados dados de atividade de transporte para os transportes aéreo (passageiros e carga), ferroviário (passageiros e carga), fluvial (passageiros e carga) e cabotagem (carga).

Na indisponibilidade de dados de atividade de transporte, lança-se mão de dados de frota acumulada, ponderada por variáveis como intensidade de uso (km-tecnologia/ano) ou consumo por tecnologia (l-tecnologia/ano). No experimento, esse protocolo é empregado para alocar a energia do modo rodoviário. Como, no Brasil, não há uma base unificada de dados de consumo ou intensidade de uso por entidade subnacional, considera-se os valores nacionais dessas variáveis.

Especificamente, as categorias de veículos automotores são agrupadas em transporte individual, distribuição física, transferência e coletivo e o resultado é

⁴⁵ Participação média da frota circulante de comerciais leves equipados com motores do Ciclo Otto entre 2016 e 2021, estimada neste estudo, com base no método descrito na Seção 4.1 (Inventário Nacional). Seguindo uma convenção histórica, a 4ª Comunicação (BRASIL, 2020) enquadra essa tecnologia para o transporte de passageiros.

⁴⁶ Participação média da frota circulante de comerciais leves equipados com motores do Ciclo Otto entre 2016 e 2021, em relação ao total de comerciais leves, estimada com base no método descrito na Seção 4.1 (Inventário Nacional). Seguindo uma convenção histórica, a 4ª Comunicação (BRASIL, 2020) enquadra essa tecnologia para o transporte de passageiros.

⁴⁷ Participação média da frota circulante de caminhões semileves, caminhões leves e 30% da frota de caminhões médios, em relação ao total de caminhões, entre 2016 e 2021, estimada com base no método descrito na Seção 4.1 (Inventário Nacional).

multiplicado pelo consumo energético (l-tecnologia/ano) de cada categoria, obtido no Inventário Nacional. Assim, veículos que consomem mais litros de um dado combustível analisado possuem um fator maior em relação a veículos mais eficientes. Como a variável em litros-tecnologia já reflete a intensidade de uso e o rendimento energético dos veículos, representa melhor o “peso” que uma categoria de veículo tem sobre as outras ao realizar a alocação para os estados, que possuem diferentes perfis de frota.

Como alternativa à indisponibilidade de dados de litros de combustível consumidos por tecnologia, sugere-se o uso da variável intensidade de uso (km-tecnologia/ano). Todavia, nesse caso, não há ponderação envolvendo o rendimento energético dos veículos. Dessa forma, dado que não há dados sobre intensidade de uso de cada estado, uma frota de 10 caminhões, percorrendo anualmente 50 mil km possuiria o mesmo ‘peso’ que uma frota de 10 automóveis, percorrendo a mesma distância anualmente. Por essa razão, recomenda-se priorizar o consumo por categoria de veículo, em conjunto com a frota por categoria de veículo, como *proxy*.

Por fim, para o transporte dutoviário, considera-se a malha existente ao longo do tempo por entidade subnacional para fazer a alocação de eletricidade referente a este modo.

Os combustíveis gasolina A, etanol anidro, etanol hidratado, gás natural, querosene de aviação, gasolina de aviação e óleo combustível não possuem competição entre modos, sendo, com isso, alocados diretamente por meio das respectivas matrizes *proxy* estaduais. Na outra vertente, as fontes energéticas Diesel mineral, biodiesel e eletricidade são consumidas por diferentes modos de transporte, demandando a aplicação de protocolo de abatimento.

Tal como no abatimento dos setores econômicos, o protocolo de abatimento da energia consumida dos modos de transporte parte daqueles com menor nível de incerteza ou com menor consumo total e finaliza com os que possuem maior incerteza ou maior consumo total. No caso do Diesel mineral e do biodiesel⁴⁸, o transporte rodoviário apresenta tanto a maior incerteza em termos de matrizes *proxy* como o maior montante de energia, sendo, portanto, o último modo nas etapas de alocação. Mais além, as atividades que constituem o modo rodoviário têm prioridades distintas, com a transferência alocada somente após a distribuição física e o transporte coletivo.

⁴⁸ Salienta-se que, diferentemente do diesel mineral, o biodiesel não tem sido consumido no transporte fluvial.

No caso da eletricidade, por sua vez, o transporte rodoviário é priorizado nas iterações de alocação por representar menos de 1% do consumo dessa energia no setor. Por fim, ajustes finos são realizados, verificando se a energia alocada para cada modo de transporte e subatividade é compatível com o perfil da mobilidade de carga e passageiros do local, seja por balanços e matrizes energéticas ou por inventários e estudos de mobilidade. A condução desses ajustes demanda, preferencialmente, informações e experiência do modelador com modelos de transportes.

Como resultado, vinte e uma matrizes de consumo energético por setor econômico, modo de transporte, atividade e subatividade são geradas. A próxima seção avalia a consistência das matrizes, comparando os resultados com estudos de referência.

5.2.1.2 Análise de consistência

Foram selecionados 12 relatórios de referência de 9 entidades subnacionais, divididos em inventários, balanços e matrizes energéticas. Como critérios de seleção, considerou-se: o detalhamento de informações que permitam identificar o método empregado; o fornecimento de dados desagregados de uso de energia; data de publicação que permita a comparação de resultados a partir de 2005 (ano base da NDC brasileira); e o fornecimento de uma linha de base com dois anos, com exceção do estudo ‘Emissões veiculares no estado de São Paulo’, por ser anualmente publicado.

Prioritariamente, a consistência foi analisada em função do uso de energia em balanços e matrizes energéticas, uma vez que as emissões atmosféricas frequentemente variam para uma mesma unidade de energia consumida em função, por exemplo, da adoção de diferentes protocolos de cálculo, fatores de emissão e de GWP entre os estudos. Além disso, os balanços e matrizes energéticas tendem a segregar a energia consumida pelos setores de forma consistente. Outrossim, o período de elaboração do estudo pode interferir nos resultados de emissão, em função da esperada atualização periódica de alguns fatores, especialmente de GEE indiretos e poluentes atmosféricos. Por esta razão, quando analisadas as emissões atmosféricas, prioriza-se os resultados de CO₂.

Eventuais ajustes foram realizados em casos pontuais, com base na relevância do estudo de referência, possuindo acesso a dados primários da entidade subnacional analisada. A Tabela 5.7 resume os documentos verificados por data de publicação.

Tabela 5.7. Comparação entre os resultados obtidos e estudos de referência

Documento	Entidade	Estado	Ano	Linha de base	Dados reportados
1. 4º Inventário de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais	CDP	MG	2022	2015-2019	Emissões (t)
2. Balanço Energético do Estado de São Paulo	Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente	SP	2022	2012-2021	Consumo (tep)
3. Inventário de Emissões e remoções de Gases De Efeito Estufa do Estado da Bahia	Secretaria do Meio Ambiente	BA	2022	2017-2019	Emissões (t)
4. Emissões veiculares no estado de São Paulo	CETESB	SP	2022	2021	▪ Emissões (t) ▪ Consumo (tep)
5. Inventário de emissões de Gases De Efeito Estufa do Estado de Pernambuco	Secretaria do Meio Ambiente e Sustentabilidade	PE	2022	2015-2022	Emissões (t)
6. Balanço energético do Estado do Espírito Santo	Agência de Regulação de Serviços Públicos	ES	2021	2008-2020	Consumo (tep)
7. Inventário de emissões do Distrito Federal	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Proteção Animal do Distrito Federal	DF	2021	2005-2018	▪ Emissões (Gg) ▪ Consumo (TJ)
8. Matriz energética do Estado do Rio de Janeiro: 2017-2031	Secretaria da Casa Civil e Desenvolvimento Econômico	RJ	2018	1985-2016	Consumo (tep)
9. Balanço energético do Estado de Mato Grosso do Sul	Secretaria de Estado de Infraestrutura	MS	2014	2004-2013	Consumo (tep)
10. Balanço Energético da Bahia	Secretaria de Infraestrutura	BA	2013	1996-2012	Consumo (tep)
11. Inventário de emissões antrópicas e sumidouros de gases de efeito estufa do Estado do Acre	Embrapa Acre	AC	2014	2010, 2012	Emissões (Gg)
12. 1º Inventário de emissões antrópicas de Gases de Efeito Estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo	CETESB	SP	2011	1990-2008	Emissões (Gg)

Fonte: autor.

Considerando os critérios estabelecidos, os dados do documento nº 2 (Balanço Energético do Estado de São Paulo) foram priorizados. Trata-se de um balanço energético, que possui um histórico consistente de linha de base (2012-2021). Assim, a diferença média entre a linha de base desagregada e a linha de base do balanço de SP é de -4,5%. O menor erro médio encontrado foi no Diesel e da gasolina C (menos de 1%), sendo os combustíveis mais representativos do estado (64% do total consumido em 2021).

Apesar disso, identificou-se uma diferença acima de 20% no consumo de óleo combustível e de GNV, que são combustíveis de baixo consumo em relação ao total do setor. Uma pequena parte da diferença do óleo combustível decorre do fator de conversão

do balanço energético de SP ser diferente do adotado pelo BEN (0,957 tep/m³ contra 0,959 tep/m³). SP

No caso do GNV, também houve divergência no fator de conversão de volume para energia (0,880 tep/m³ contra 0,993 tep/m³). Possivelmente, os autores consideraram o fator do gás natural úmido na conversão. Não obstante, entende-se que a variável *proxy* adotada⁴⁹ no presente estudo, de fato, não reflete com acurácia a parcela de motoristas que convertem seus veículos nos estados, sendo mais indicada uma base consolidada com dados de kits de conversão ou de venda de gás natural por estado⁵⁰. Ademais, a Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente de SP possui acesso a dados primários, aferindo maior acurácia aos resultados. Isto posto, considerando a relevância do estudo de SP, houve um ajuste na iteração de alocação para equivaler os resultados tanto de óleo combustível como de GNV.

Ainda em relação ao GNV, no estado do RJ, um erro na ordem de 300% foi verificado para este combustível. Todavia, o erro total, considerando todo o estado, é inferior a 5%. Novamente, atribui-se esse erro à inexistência de GNV nos relatórios de vendas reportados pela ANP, bem como à variável *proxy* adotada para o gás. O RJ é o maior produtor doméstico de gás natural, bem como consumidor em veículos convertidos. Dessa forma, a frota acumulada de automóveis não necessariamente reflete esse montante. Por essa razão, assim como no caso do GNV de SP, houve ajuste na iteração de alocação para equivaler os resultados.

Nos demais estudos das entidades subnacionais, o erro médio identificado na linha de base está dentro de uma variação esperada, especialmente considerando que são comparados estudos com procedimentos e dados diferentes, conduzidos em épocas diferentes. Na maior parte dos casos, sobretudo em balanços e matrizes energéticas, por motivos esperados, o erro identificado mais frequente foi no transporte aéreo, na situação em que não houve a segregação do volume de *bunker*. Em alguns casos, não há a separação de diesel mineral e biodiesel, bem como de gasolina A de etanol anidro, dificultando uma comparação precisa, haja vista que, na maior parte dos casos, os teores de biocombustíveis não são informados.

Em síntese, nos demais estados, identificou-se erro médio na ordem de: BA (1%); MG (2%); AC (2%); PE (3%); ES (5%); MS (8%); DF (8%). Salienta-se que, quanto

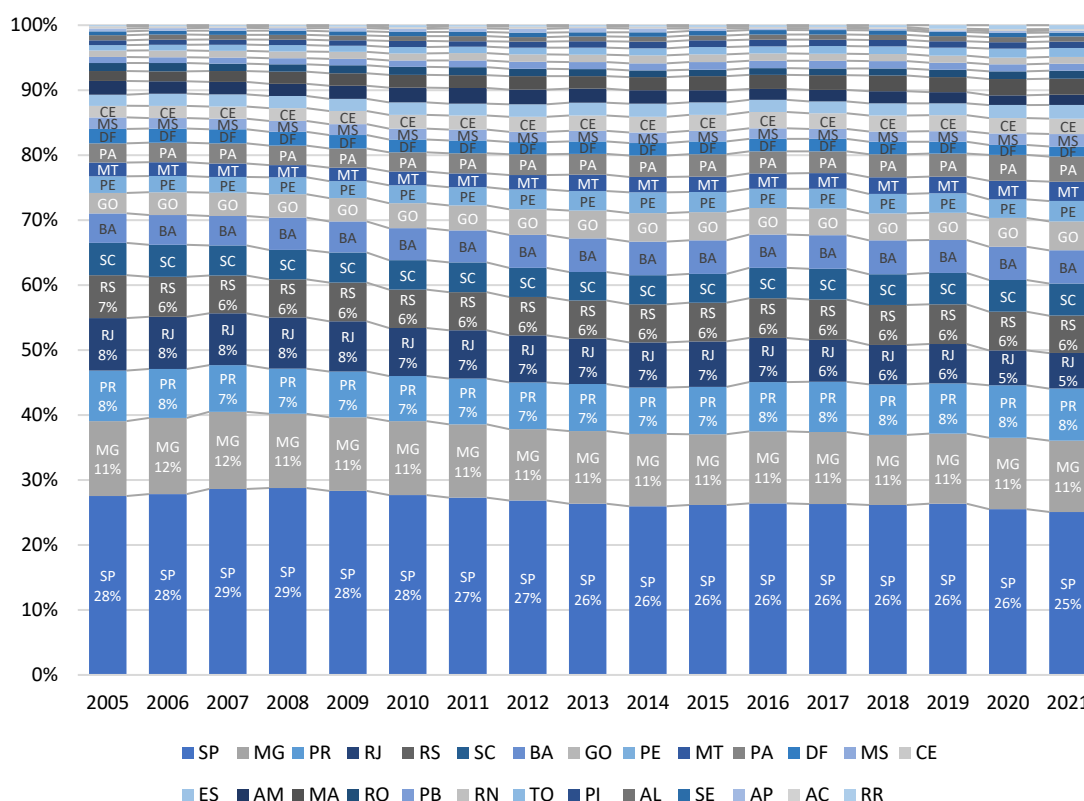
⁴⁹ Ou seja, frota acumulada de automóveis.

⁵⁰ A ANP não fornece essa informação.

menor a participação de um estado em relação ao total nacional maior o impacto da diferença. Portanto, erro médio de 8% para estados não representativos reforça a consistência do método desenvolvido nesta tese.

5.2.1.3 Resultados e discussão

A Figura 5.18 ilustra a participação das entidades subnacionais em função do uso de energia.



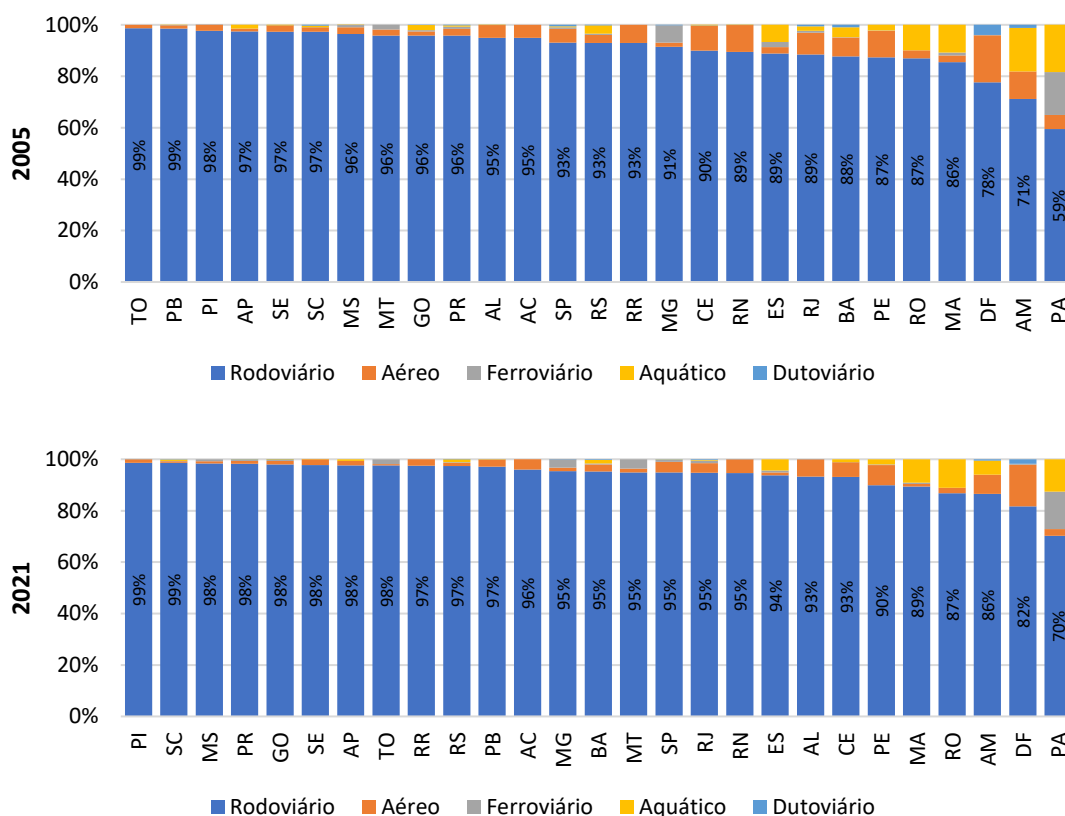
Fonte: autor.

Figura 5.18. Uso de energia desagregado por entidade subnacional

Em 2005, o setor de transportes brasileiro consumiu 52.951 ktep, com 55% do montante oriundo de apenas quatro estados (SP, MG, PR e RJ). Em 2021, o setor consumiu 82.262 ktep e participação desses estados caiu para 50%. A maior queda em participação é observada no RJ (-3%), seguida de SP (-2%). Apesar da redução da participação de SP no período, o consumo do estado cresceu em média 2,9% a.a., enquanto o consumo do RJ cresceu apenas 0,5% a.a.

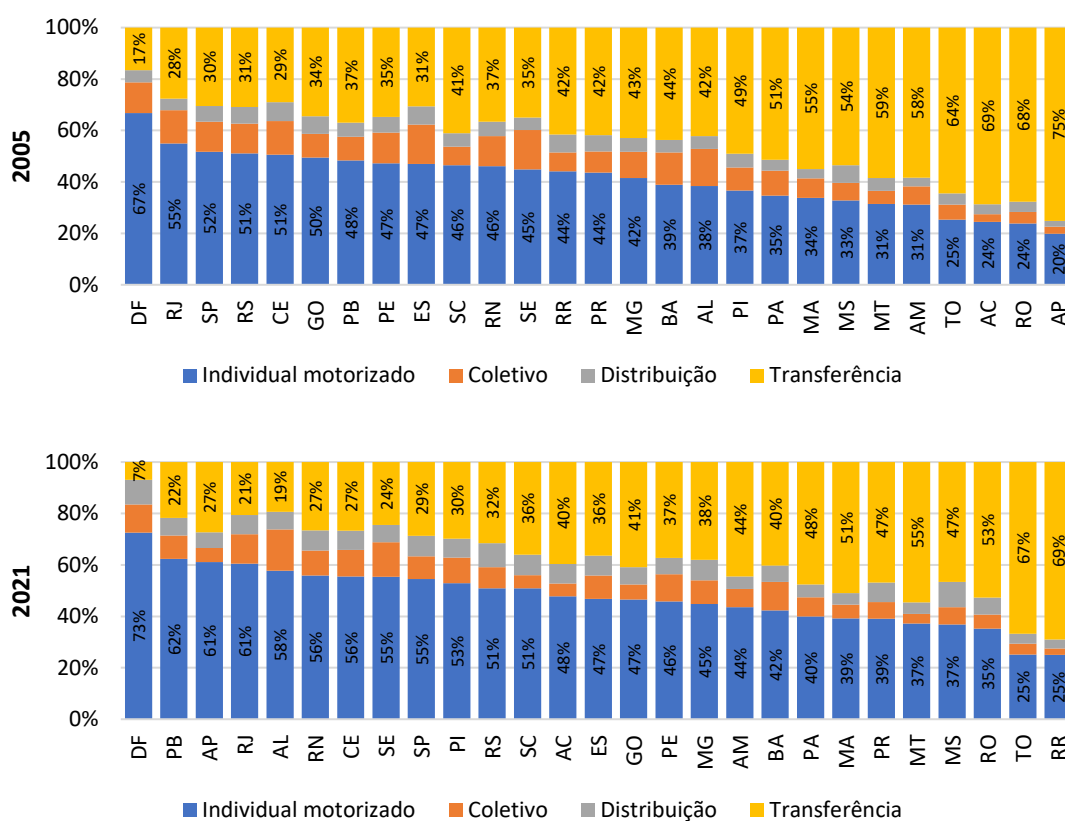
Ainda considerando os quatro estados, o crescimento médio do consumo energético foi de 2,5% a.a., contra 7% a.a. dos demais estados. Nesse segundo caso, os estados de GO (1,3%), PA (0,9%), MA (0,9%) e MT (0,9%) representaram os maiores avanços em participação no setor. Parte da ampliação da participação é justificada pelo avanço populacional e econômico desses estados em ritmo anual próximo ao dobro do verificado no bloco composto por SP, MG, PR e RJ. Além disso, a disposição dos modos de transporte e o perfil de uso podem explicar os diferentes ritmos de evolução do consumo.

As figuras 5.19 e 5.20 expõem a divisão do uso de energia subnacional por modo de transporte e por subatividade. Informações quantitativas complementares e de outros anos são fornecidas na seção 5.3 (MRV) e no Apêndice B.



Fonte: autor.

Figura 5.19. Divisão do uso de energia subnacional por modo de transporte



Fonte: autor.

Figura 5.20. Divisão do uso de energia subnacional por subatividade rodoviária

O transporte rodoviário predomina em todos os estados ao longo da série temporal. Em 2005, apenas no DF, AM e PA o modo rodoviário não tinha participação acima de 85% do uso de energia (média nacional de 91%). Em 2021, somente o DF e o PA ainda mantinham participações abaixo de 85% (média nacional de 94%). Mesmo assim, isso representa um avanço de 11% de participação do transporte rodoviário no PA, alavancado, principalmente, pelo aumento do energeticamente intensivo transporte individual motorizado (Figura 5.20).

Esse fenômeno é verificado na maior parte dos estados, com a ampliação da participação do transporte individual motorizado e da distribuição física, em detrimento do transporte coletivo e de transferência. Essa conjuntura decorre de fatores, como: (i) o estímulo histórico ao transporte individual motorizado, seja, por exemplo, por meio da estruturação das cidades ser orientada ao trânsito de veículos ou das reduções do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) em 2008 e 2012 (ANPTRILHOS, 2018); (ii) a perda de atratividade do transporte coletivo, por exemplo, via modelos de negócio mal

estruturados e centrados nos operadores (GOES *et al.*, 2021); e (iii) o crescimento das entregas de mercadorias e alimentos na última milha (UNTERSTELL *et al.*, 2021).

Por sua vez, no DF, a participação do modo rodoviário cresceu 4%, mas com um aumento ainda maior dos intensivos transporte individual motorizado e distribuição física. Salienta-se ainda a peculiaridade da alta participação do transporte aéreo no uso de energia do DF, 18% em 2005 e 16% em 2021, muito acima da média de 5% e 3%, respectivamente. Tal observação é justificada por ser a capital do país e estar localizada a longa distância rodoviária dos principais centros econômicos do país (SP e RJ).

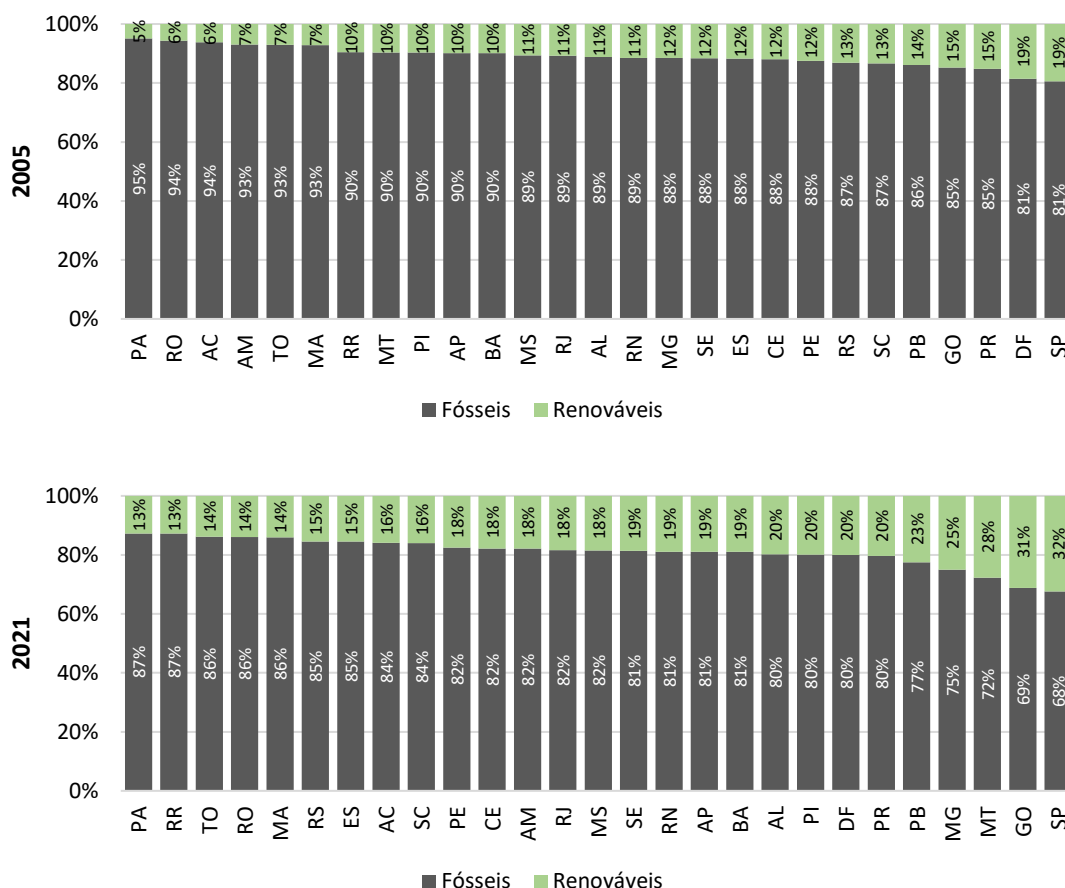
Ademais, o DF é caracterizado por ter a menor participação do transporte rodoviário de transferência. Em 2005, somente 17% do uso de energia do transporte rodoviário decorria desse tipo de atividade, reduzindo para apenas 7% em 2021, embora, no período, a distribuição física saltou de 5% para 10%. A redução da participação da transferência no transporte rodoviário é observada em 20 estados, especialmente AC (48%) e AP (29%). Isso pode indicar os efeitos do fenômeno recente de aumento das entregas de última milha, seja de alimentos ou de pacotes, sobretudo em estados que tinham um maior potencial de crescimento da urbanização (diferentemente de SP, cuja parcela da transferência reduziu apenas 2%).

No que tange à origem da energia consumida pelo setor de transportes nos estados, há uma grande amplitude de participação de renováveis (Figura 5.21). Ressalta-se que a energia renovável em 2005 era composta, principalmente, por etanol anidro e hidratado. A eletricidade representava apenas 5% da energia renovável, enquanto o biodiesel ainda estava em fase de implantação voluntária. Além disso, o mercado de veículos do tipo *flexible-fuel* era incipiente (5% da frota circulante de automóveis e comerciais leves), cujas vendas iniciaram em 2003. Ainda assim, SP e o DF se destacavam com 19% de participação de renováveis, acima da média nacional vigente de 14%.

Em 2021, os combustíveis renováveis ampliaram sua participação, seja por um mercado predominado por veículos do tipo *flexible-fuel* (72% da frota circulante de automóveis e comerciais leves), pela maturação da mistura de 27% de etanol anidro na gasolina C, ou pelo pico de 13% de mistura regulamentada de biodiesel no Diesel (impulsionado pelo Programa RenovaBio, lançado em 2018), atingido em março de 2021, mas reduzido para 10% em setembro do mesmo ano.

Nessa linha, SP ainda lidera com 32% de participação de renováveis, mas, dessa vez, seguido por GO, MT e MG. Os três estados se destacaram por apresentarem em 2021

os menores preços relativos de etanol hidratado em comparação à gasolina C (ANP, 2023), o que estimulou o seu abastecimento em veículos do tipo *flexible-fuel*.



Fonte: autor.

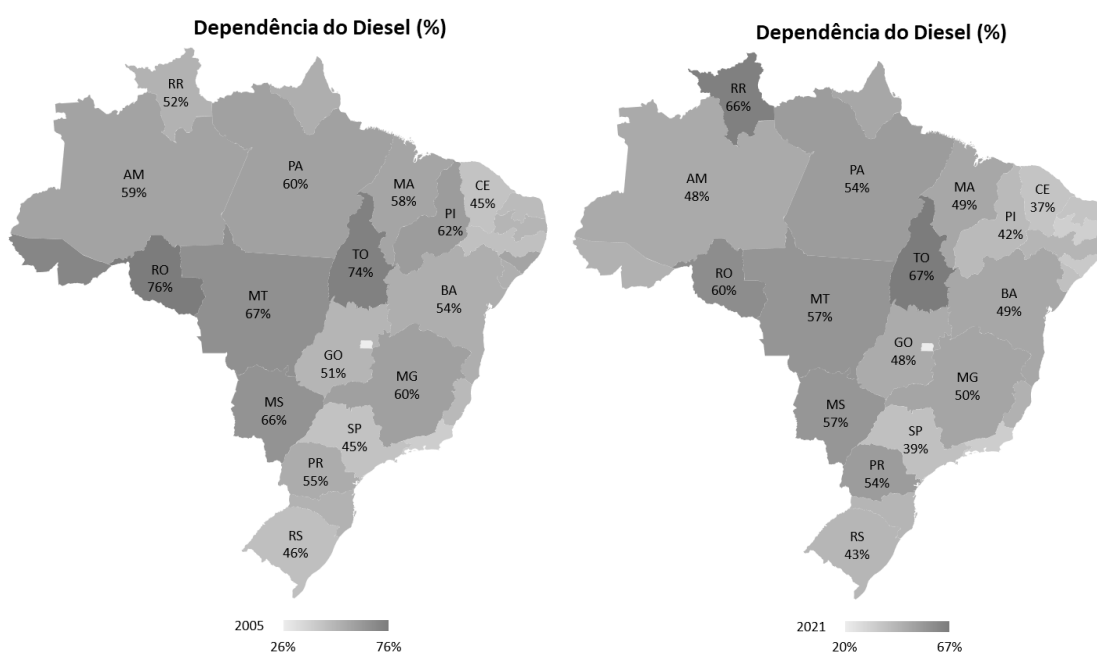
Figura 5.21. Participação de energia fóssil e renovável por entidade subnacional

Apesar do avanço do consumo de renováveis, a dependência do Diesel mineral ainda permanece alta nos estados brasileiros, sobretudo em estados da região Norte (AC, TO e RO). Em 2005, a dependência do Diesel, em média, era de 51% no país, tendo como destaque o DF, cuja participação era de apenas 26%. Em 2021, a dependência média do Brasil caiu 6% (45%), incluindo nos três estados da região Norte analisados (AC, TO e RO).

O Estado de RR foi o único em que houve aumento da dependência do Diesel mineral (de 52% para 66%), refletindo o aumento a participação do transporte de caminhões pesados por transferência que fora evidenciado na Figura 5.20. Ressalta-se que, até 2017, tanto a participação do transporte por transferência como a dependência do Diesel mineral estavam em queda, tendo um ponto de inflexão em 2018, ano em que o

governo federal acenou para interromper as estratégias de desenvolvimento de baixa emissão em andamento, implementando políticas de exploração econômica de florestas e terras indígenas por mineradoras, madeireiras ou agroindústrias (STARGARDTER e BOADLE, 2019).

Salienta-se ainda que a investigação desse tipo de evidência não está no escopo da presente tese, devendo ser conduzida por meio de estudo específico. Todavia, o fornecimento e detalhamento de tais evidências caracteriza mais uma contribuição inovadora do presente estudo, haja vista que não há estudos e observatórios que discretizam dados rodoviários a nível de subatividade, reduzindo o potencial de análise.



Fonte: autor.

Figura 5.22. Dependência do Diesel mineral nas entidades subnacionais

É notório que o DF se destaca com a menor dependência do Diesel mineral, ou seja, 26% em 2005 e 20% em 2021, muito abaixo da média nacional nos respectivos anos. Parte disso é justificado pela menor abrangência territorial do distrito, proporcionalmente, com poucos abastecimentos realizados dentro de suas fronteiras. Apesar da baixa dependência do Diesel Mineral, o DF não se destaca nacionalmente quanto à participação de energia renovável, estando 3% abaixo da média nacional em 2021.

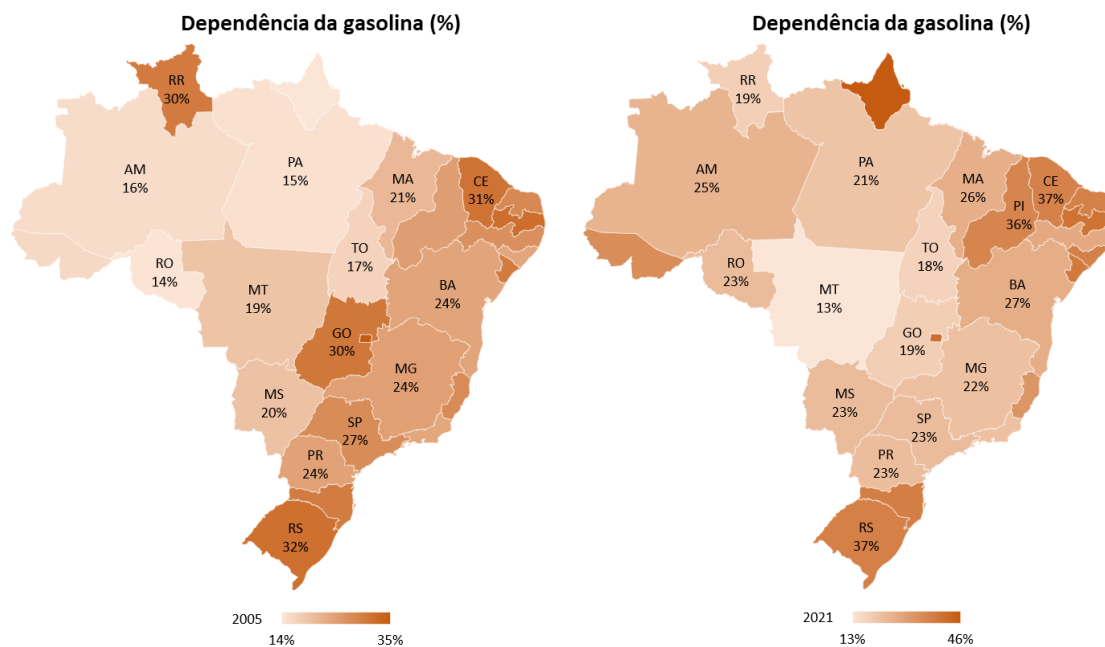
Analisando a Figura 5.20, nota-se que o DF possui a maior participação do transporte individual motorizado do país, o que é esperado, haja vista apresentar um perfil de uso do solo e de atividades típico de uma região metropolitana. Esse perfil de

mobilidade reflete também a segunda maior dependência de gasolina A (42% em 2021), abaixo apenas do estado do AP, altamente dependente tanto do Diesel mineral como da gasolina A.

Esses resultados apontam que a análise apenas do indicador de dependência do Diesel mineral ou de participação de renováveis podem apresentar resultados não condizentes com a realidade no local, em termos de avanço de políticas de sustentabilidade. Apesar de a gasolina A apresentar concorrentes como o etanol hidratado, GNV e a eletricidade, a baixa competitividade dessas alternativas no Brasil frente à gasolina tem potencializado o problema dessa dependência, ainda negligenciada. Por exemplo, a atual configuração da indústria de etanol e da política de preços não desacopla o preço do etanol hidratado ao preço da gasolina C, dado que os produtores optam por exportar açúcar quando o preço da *commodity* se torna mais vantajoso. Além disso, o caráter sazonal da produção de etanol inviabiliza políticas agressivas ao longo do ano.

Esse problema indica o potencial da mobilidade elétrica como vetor da redução da dependência da gasolina A no Brasil, dada a falta de instrumentos políticos e financeiros para desacoplar o preço do etanol hidratado frente à gasolina C (GOES *et al.*, 2022). Apesar disso, o uso de eletricidade no transporte rodoviário ainda anda a passos lentos, atingindo apenas 0,003% do consumo energético deste modo de transporte em 2021.

A Figura 5.23 ilustra a dependência de gasolina A nas entidades subnacionais brasileiras. Apesar dos esforços em ampliar o uso de biocombustíveis no transporte individual motorizado (automóveis e comerciais leves do tipo *flexible fuel*), nacionalmente, a dependência média de gasolina A permanece em 26% tanto em 2005 como em 2021, embora haja variações, com destaque para o AP (+32%) e GO (-12%).



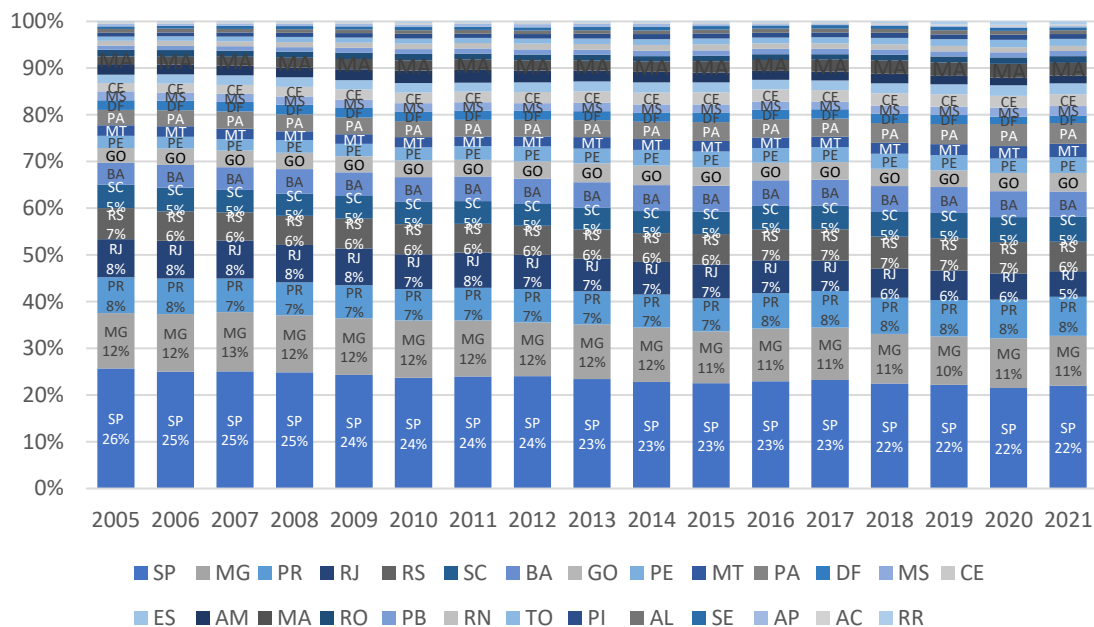
Fonte: autor.

Figura 5.23. Dependência da gasolina A nas entidades subnacionais

As diferentes configurações de uso de energia nas entidades subnacionais acarretam níveis distintos de emissões atmosféricas. As emissões podem ser analisadas tanto em níveis absolutos como em indicadores relativos (intensidade, participação etc.). Isto posto, a Figura 5.24 ilustra as emissões de GEE absolutas por entidade subnacional.

Assim como no uso de energia, considerando o ano de 2005, os quatro estados mais emissores são SP, MG, PR e RJ (superado pelo RS a partir de 2017). Apesar disso, é possível observar os esforços de estados que usam com mais intensidade energia de fontes renováveis. Esse é o caso do estado de SP, que representa 25% do total de energia consumida no setor de transportes brasileiro, mas contabiliza 22% das emissões de GEE em 2021. Como visto, SP possui o maior percentual de energia renovável dentre os estados brasileiros (32% em 2021) ao mesmo tempo que apresenta, relativamente, baixa dependência do Diesel mineral (39%) e de gasolina A (23%).

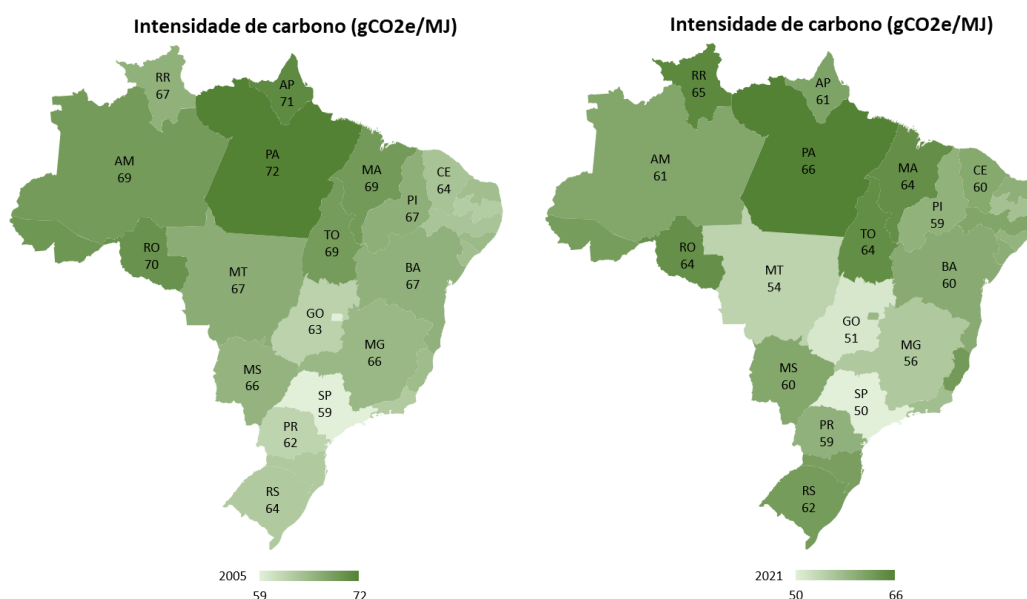
Reforça-se que, por consumir eletricidade, os modos dutoviário e ferroviário de passageiros, além da mobilidade elétrica no rodoviário, são enquadrados como emissão zero no uso final.



Fonte: autor.

Figura 5.24. Emissões atmosféricas desagregadas por entidade subnacional

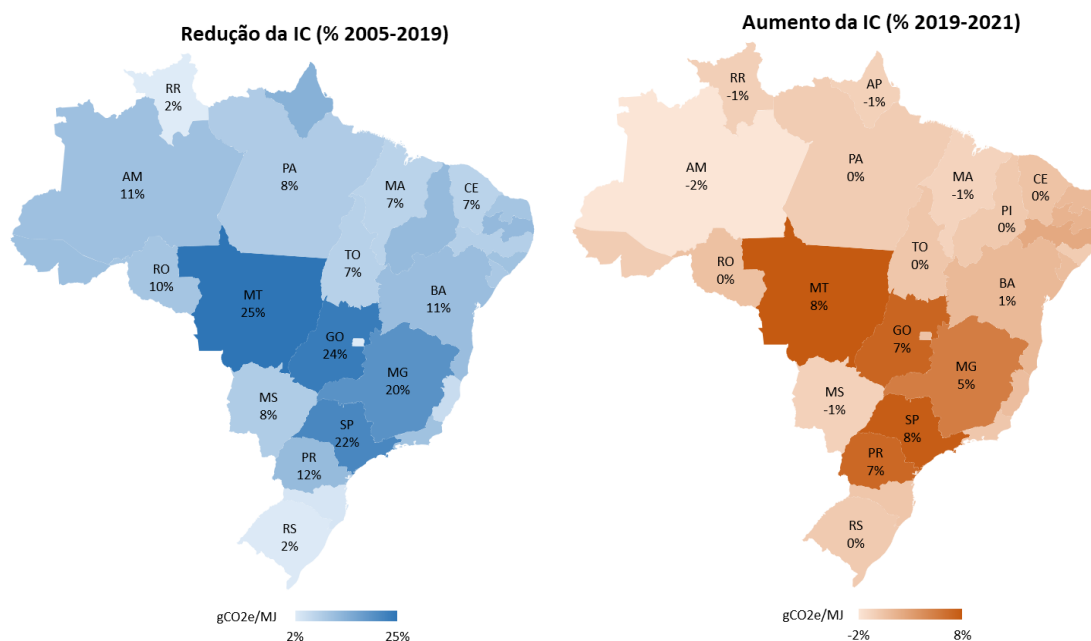
Por conseguinte, os diferentes perfis de uso de energia e as consequentes emissões de GEE dos estados são refletidos por meio da estimativa da intensidade de carbono. O indicador estimado, em gCO_2e/MJ , ilustrado na Figura 5.25, considera as mesmas unidades da meta do RenovaBio de redução da intensidade de carbono da matriz de transportes do Brasil.



Fonte: autor.

Figura 5.25. Intensidade de carbono nas entidades subnacionais

Evidenciando a relação entre as figuras 5.19 e 5.24 (consumo de energia e emissões por entidade subnacional), SP apresenta a menor intensidade de carbono do país, tanto em 2005 como em 2021. No outro extremo, o PA apresenta a maior intensidade de carbono no mesmo período. A evolução da intensidade é ilustrada na Figura 5.26, apontando dois intervalos distintos, antes e depois da pandemia de COVID-19.



Fonte: autor.

Figura 5.26. Dependência da gasolina A nas entidades subnacionais

A primeira imagem representa a variação da intensidade de carbono até 2019, último ano antes da pandemia. Neste primeiro período, os estados do MT, GO, SP e MG se destacam, sobretudo pelo menor preço histórico do etanol hidratado nos locais. Em 2020 e 2021, são verificados aumentos ou estabilização da intensidade de carbono nos estados. Em apenas cinco estados, verificou-se melhoria do indicador (1% em média).

Esse fenômeno se justifica por meio das pressões inflacionárias sobre o preço dos combustíveis fósseis, a partir do segundo semestre de 2020, em conjunto com a valorização do preço internacional de *commodities*, aumentando, por exemplo, tanto o preço do Diesel e da gasolina C como do preço do etanol hidratado. O aumento do preço do etanol hidratado, acompanhando ou superando a variação da gasolina C, reduziu significativamente a sua atratividade, diminuindo o seu consumo. Como os ganhos em intensidade de carbono foram maiores nos estados do MT, GO, SP e MG, o encarecimento

do etanol hidratado e o consequente aumento proporcional do uso de gasolina C, implica a piora mais intensa nesses estados durante a pandemia de COVID-19.

5.2.2 Desagregação espacial tiers 2 e 3

Como abordado, o diferencial da aplicação do procedimento *tiers 2 e 3* é a obtenção de dados baseados na intensidade de uso ou movimentação de passageiros e carga, ampliando o detalhamento de um MRV, enquanto fornece uma estimativa das emissões de GEE indiretos e poluentes atmosféricos que dependem de variantes de tecnologia e do nível de atividade do modo de transporte. Esta seção apresenta as iterações de alocação e discorre sobre os resultados obtidos.

5.2.2.1 Iterações de alocação

Para efeito deste experimento, a desagregação espacial *tiers 2 e 3* é aplicada apenas ao transporte rodoviário. Isso se justifica dada a ausência de dados nacionais e subnacionais por locomotiva (ferroviário) e tipo de motor de embarcações (aquático). No caso do transporte aéreo, apesar de a 4ª Comunicação adotar uma abordagem *tier 3A* (BRASIL, 2020), os dados primários, armazenados pela ANAC, não são acessíveis ao público.

No caso do inventário nacional, estimado nesta tese (seção 5.2), essa restrição foi atenuada ao multiplicar o consumo energético anual pelos fatores de emissão implícitos estimados por meio da abordagem *tier 3A*, adotada no estudo ANAC (2020) e na 4ª Comunicação (BRASIL, 2020). Assim, a desagregação espacial *tiers 2 e 3*, para o transporte rodoviário, adota FEs baseados em variantes tecnológicas, para gases não-CO₂, ou teor de carbono local (CO₂).

Além disso, em decorrência da maior disponibilidade de dados sobre o transporte rodoviário local, como forma de validação do método, opta-se por centrar a aplicação do procedimento *tiers 2 e 3* nas emissões atmosféricas de SP. A Tabela 5.8 apresenta as atividades envolvidas na desagregação via procedimento *tiers 2 e 3* para o transporte rodoviário.

Tabela 5.8. Comparação entre os resultados obtidos e estudos de referência

Atividade	Detalhamento
1. Abatimento de setores não-transportes	Mesmas iterações da abordagem <i>tier 1</i>
2. Abatimento de bunker	
3. Alocação da energia ao setor de transportes	
4. Matriz de frota acumulada por entidade subnacional	Aferição da participação de cada entidade subnacional na frota acumulada brasileira e aplicação do resultado sobre a frota circulante do inventário nacional
5. Balanceamento de veículos entre os estados	Estimativa da frota de veículos licenciados em um estado, mas que circulam em outros, adicionando o resultado sobre a frota circulante desagregada
6. Coleta de dados locais	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coleta de dados de intensidade de uso ou movimentação por entidade subnacional ▪ Atualização da fatia de mercado de etanol hidratado e gasolina C nos estados ▪ Dados socioeconômicos (população, PIB, PIB per capita etc.)
7. Coleta de informações-chave do inventário nacional	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fatores de emissão por gás e tecnologia ▪ Rendimento energético por tecnologia
8. Cálculo das emissões atmosféricas e da energia por entidade subnacional	Aplicação do método <i>bottom-up tiers 2 e 3</i> descrito na seção 4.1
9. Divulgação dos resultados por entidade subnacional	Emissões atmosféricas por GEE diretos, indiretos e poluentes atmosféricos

Fonte: autor.

A desagregação espacial *tiers 2 e 3* demanda a realização das mesmas atividades de abatimento de setores não-transportes, abatimento de bunker e alocação da energia ao setor de transportes. Como alternativa, é possível coletar o consumo energético de, por exemplo, um balanço subnacional. Todavia, convencionalmente, os balanços publicados no Brasil não separam a energia entre transporte de carga e passageiros, impactando principalmente a estimativa do diesel e biodiesel.

Assim, o consumo desagregado em carga e passageiros, por fonte energética, ou o consumo coletado em inventários balanços e matrizes locais, também dividido em carga e passageiros será considerado o valor de referência a ser atingido pelo método *bottom-up*. Tal procedimento é equivalente ao considerado no inventário nacional, em que o resultado da abordagem *top-down* é referência para o ajuste da intensidade de uso do método *bottom-up*.

A partir disso, estima-se, por meio da frota acumulada, por categoria de veículo e entidade subnacional, disponível na SENATRAN (2022), a participação do estado analisado na frota acumulada nacional. Nesse caso, adaptações entre as categorias dispostas na SENATRAN e as categorias consideradas no inventário nacional são realizadas, conforme a Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Critérios de enquadramento das categorias de veículo

Categoria Inventário	Categoria SENATRAN
Motocicletas	Motocicletas e motonetas
Automóveis	Automóveis
Comerciais leves	Caminhonetes e camionetas
Caminhões semileves, leves e médios	35% da frota acumulada da categoria ‘caminhões’
Caminhões semipesados e pesados	65% da frota acumulada da categoria ‘caminhões’ + ‘caminhão trator’
Micro-ônibus	Micro-ônibus
Ônibus urbanos e rodoviários	Ônibus

Fonte: autor.

Além desse critério de alocação, considera-se o balanceamento de veículos de locadoras, uma vez que, por questões tributárias e burocráticas, aproximadamente 65% dos licenciamentos anuais de veículos de locadoras no Brasil são realizados no Departamento Estadual de Trânsito (DETRAN) de MG. Os licenciamentos anuais de veículos de locação são disponíveis nos anuários da Associação Brasileira das Locadoras de Automóveis (ABLA, 2022). Por sua vez, adotou-se a participação da frota acumulada da SENATRAN de SP em relação ao Brasil como critério de rateio dos veículos licenciados em MG, mas que circulam em SP.

A participação de SP na frota acumulada, por categoria, ponderada pelo número de veículos de locação licenciados em MG, é multiplicada pela frota circulante estimada no inventário nacional. Assim, obtém-se uma frota efetivamente em circulação, em linha com o inventário nacional, o que melhora a precisão das estimativas *bottom-up* subnacionais. Ressalta-se que, como a participação da frota acumulada ponderada de SP é aplicada diretamente sobre a frota circulante nacional, as funções de sucateamento *Gompertz* e *Logística* não são aplicáveis. A depender da disponibilidades de dados locais, pode-se considerar também os mesmos dados do inventário nacional quanto à:

- Intensidade de uso (km-veículo/ano);
- Fatia de mercado de etanol hidratado e gasolina C;

- Fatores de emissão por gás e tecnologia; e
- Rendimento energético por tecnologia.

Neste experimento, considerou-se a intensidade de uso de referência do estado de SP, fornecida pela CETESB (2021), bem como estimou-se a ‘curva-flex’ com base correlação entre os preços históricos do etanol hidratado e da gasolina C no estado de SP (ANP, 2023), mesmo protocolo adotado na 4ª Comunicação (BRASIL, 2020).

5.2.2.2 Análise de consistência

O estado de SP se destaca pela quantidade de estudos de referência em energia e emissões atmosféricas do setor de transportes. Assim como verificado no protocolo de análise de consistência da seção 5.2.1.2, após verificar a aderência do consumo energético com estudos de referência, prioriza-se as emissões de CO₂, haja vista ser um gás cujos parâmetros não sofrem variações significativas. Por exemplo, os GEE não-CO₂ e poluentes atmosféricos são sensíveis a atualizações históricas de dados como penetração de tecnologias na frota circulante), curva *flex*, fatores de emissão por tecnologia, intensidade de uso por tecnologia etc. Dessa forma, essa simplificação reduz incertezas quando comparados estudos de épocas diferentes com bases de dados e procedimentos distintos.

Isto posto, foram selecionados três relatórios para comparação, conforme Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Comparação entre os resultados obtidos e estudos de referência

Documento	Entidade	Estado	Ano	Linha de base	Dados reportados
1. Balanço Energético do Estado de São Paulo	Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente	SP	2022	2012-2021	Consumo (tep)
2. Emissões veiculares no estado de São Paulo	CETESB	SP	2022	2021	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emissões (t) ▪ Consumo (tep)
3. 1º Inventário de emissões antrópicas de Gases de Efeito Estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo	CETESB	SP	2011	1990-2008	Emissões (Gg)

Fonte: autor.

Como a desagregação *tiers* 2 e 3 seguiu os mesmos passos iniciais da abordagem *tier* 1, a diferença média verificada ao longo da linha de base desagregada e do Balanço Energético do Estado de São Paulo é a mesma (-4,5%). Reforça-se que o cálculo das

emissões atmosféricas considerado no procedimento de desagregação *tiers* 2 e 3 segue uma abordagem *bottom-up*, na qual a energia estimada, por tecnologia, é ajustada, via intensidade de uso, para equivaler ao total de energia agregada (*top-down*). Por essa razão, a energia final por tecnologia é equivalente à energia obtida na desagregação espacial *tier* 1, que apresenta menor nível de detalhes⁵¹.

O estudo ‘Emissões veiculares no estado de São Paulo’ (CETESB, 2022) apresenta os resultados para 2021 de um método *bottom-up* que considera parâmetros aproximados aos inseridos experimento, por exemplo, FEs e rendimento energético⁵². Por ser um estudo recente, elaborado no mesmo período, optou-se por comparar as emissões de CO₂ equivalente⁵³, haja vista que serão comparados os mesmos FEs *tier* 3 para gases não-CO₂. Nesse caso, as emissões de HFC 134a foram suprimidas, uma vez que o estudo da CETESB não modela esse GEE. Com isso, a diferença encontrada foi de -3,4%.

Ao comparar a série de relatórios do inventário de SP (2006-2021), a diferença média aumenta para 6%. Contudo, o erro aumenta quanto maior a diferença do período de publicação dos estudos, haja vista a existência de esperados aperfeiçoamentos periódicos nos coeficientes, fatores e procedimentos. É importante ressaltar que o estudo de SP calcula as emissões a partir das vendas, ou seja, não desagrega a partir de uma base de frota acumulada nacional com balanceamentos entre setores, modos de transporte e frotas de aluguel.

Finalmente, o 1º Inventário de emissões antrópicas de Gases de Efeito Estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo, publicado em 2011, apresenta uma linha de base antiga (2005-2008), inviabilizando uma comparação direta entre GEE-não CO₂. Por essa razão, comparou-se apenas os resultados de CO₂ do transporte rodoviário. Nesse caso, a diferença média obtida foi de apenas 1,96%.

Os três estudos de referência apresentam objetivos diferentes (balanço energético, inventário do transporte rodoviário, inventário multissetorial), períodos diferentes e níveis de detalhamento diferentes. Advoga-se, portanto, que o baixo erro médio identificado reforça a confiabilidade do procedimento de desagregação *tier* 2 e 3.

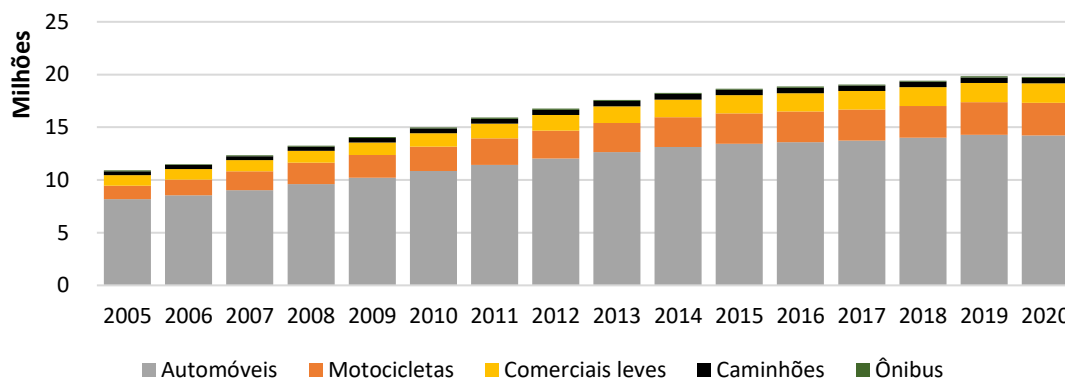
⁵¹ Devido à menor disponibilidade de dados, na desagregação *tier* 1, as diversas tecnologias que compõem a categoria ‘automóveis’ (veículos do tipo ‘flex’, veículos dedicados a gasolina etc.) são resumidas na categoria ‘transporte individual motorizado’. Isso representa um menor detalhamento sobre os direcionadores das emissões atmosféricas do transporte rodoviário.

⁵² Salvo no caso das categorias de caminhões.

⁵³ O estudo de SP apresenta apenas a unidade equivalente, não reportando as emissões dos gases não-CO₂ separadamente.

5.2.2.3 Resultados e discussão

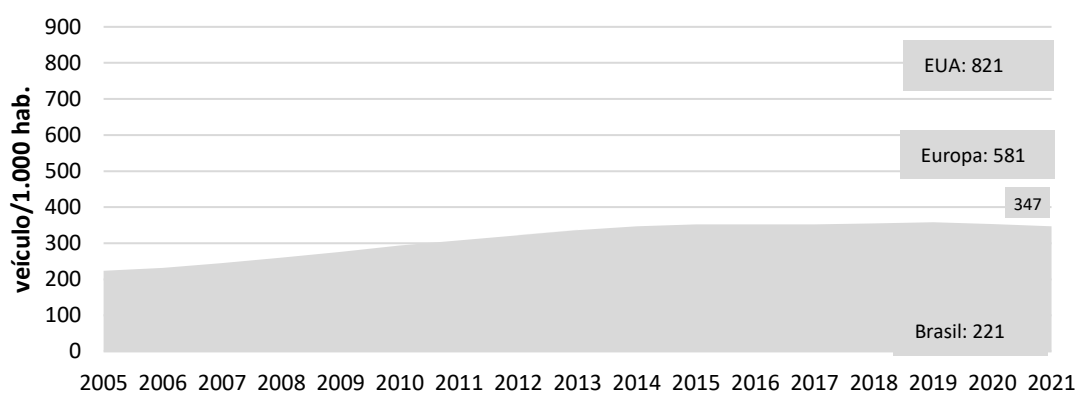
A Figura 5.27 ilustra a frota circulante do estado de SP. Em 2021, a frota estimada para SP é de 19,7 milhões de veículos, 29% da frota circulante nacional. Impulsionada pelo ganho de participação de motocicletas, a frota do estado cresceu em um ritmo de 4% a.a. até 2019, apresentando quedas de 0,2% em 2020 e 2021.



Fonte: autor.

Figura 5.27. Frota circulante de SP por categoria de veículo

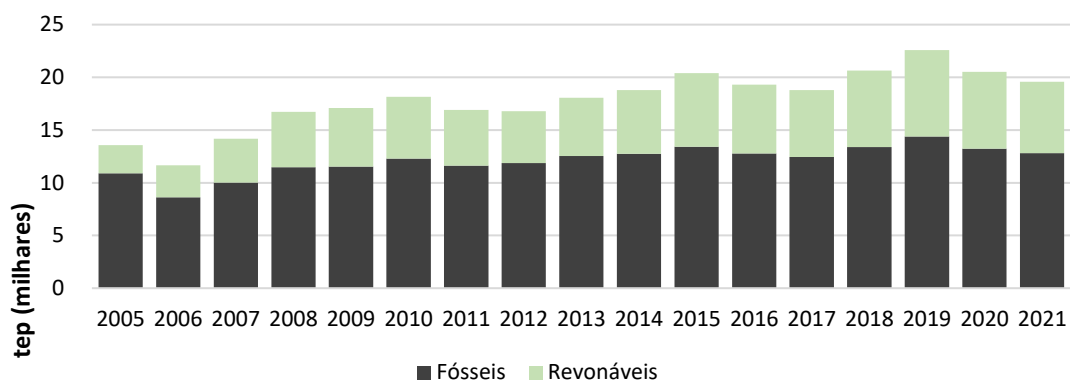
A elevada participação da frota circulante de SP reflete uma taxa de motorização 48% superior à média nacional, mas ainda inferior ao observado nos países da União Europeia e nos Estados Unidos (Figura 5.28).



Fonte: autor.

Figura 5.28. Taxa de motorização em SP

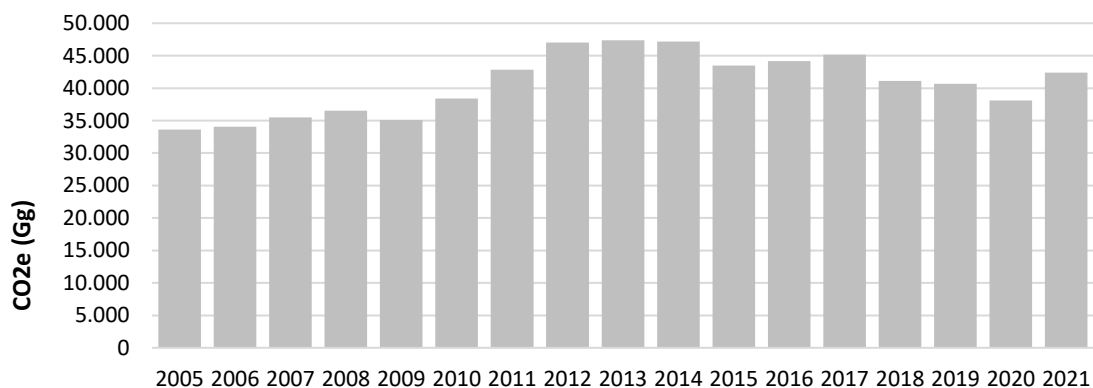
Em 2021, o transporte rodoviário consumiu 19,5 mil tep de energia, representando 25% do consumido por este modo no Brasil. Trinta e cinco por cento da energia consumida em 2021 foi oriunda de fontes renováveis (Figura 5.19). Essa participação era 20% em 2005. O alto nível decorre do elevado consumo de etanol, especialmente hidratado, no estado.



Fonte: autor.

Figura 5.29. Uso de energia no transporte rodoviário de SP

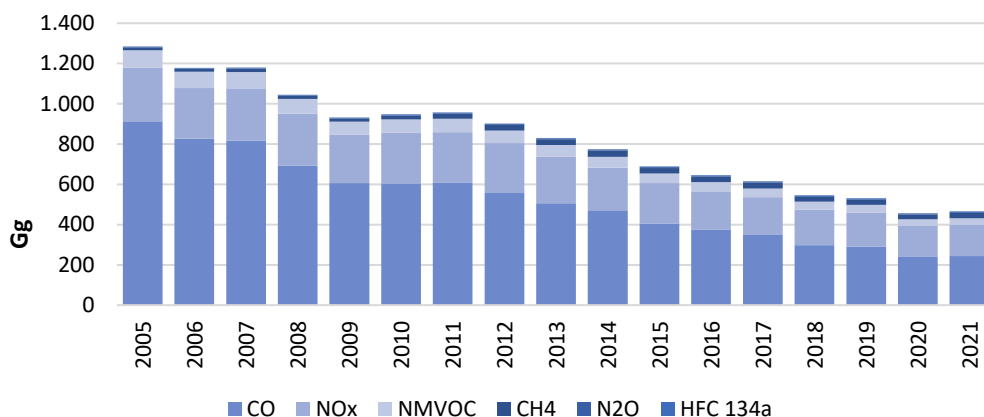
Por sua vez, a Figura 5.30 ilustra as emissões de CO₂e do transporte rodoviário de SP. No período 2005 a 2021, as emissões do estado cresceram a um ritmo médio de 2% a.a. Em comparação, as emissões de SP representaram 22% das emissões do transporte rodoviário brasileiro em 2021. A menor proporção em relação ao consumo energético decorre do uso intensivo de energia renovável, em comparação aos demais estados (ver seção 5.2.1).



Fonte: autor.

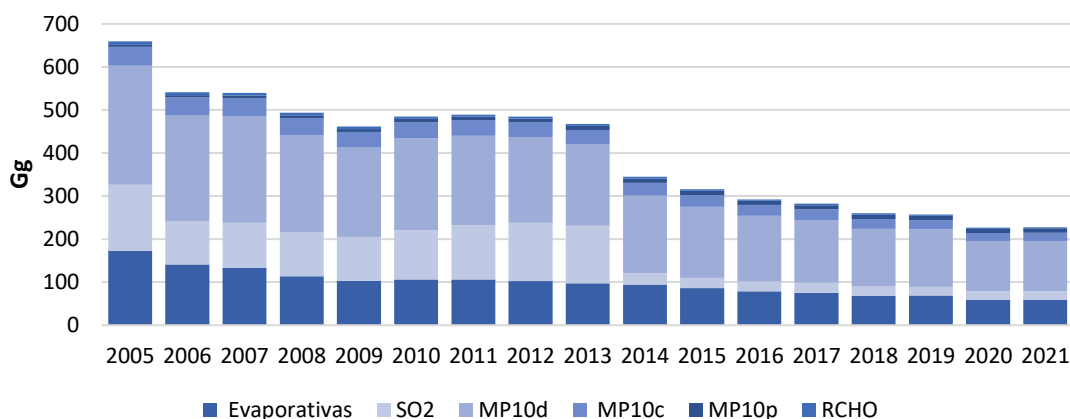
Figura 5.30. Emissões de GEE diretos no transporte rodoviário de SP

Em seguida, as figuras 5.31 e 5.32 apresentam os resultados da desagregação para os GEE diretos e indiretos não-CO₂, bem como para os demais poluentes atmosféricos modelados.



Fonte: autor.

Figura 5.31. Emissões dos GEE diretos e indiretos não-CO₂ em SP



Fonte: autor.

Figura 5.32. Emissões dos demais poluentes atmosféricos em SP

Com exceção do HFC 134a, intimamente ligado ao aumento da frota circulante de automóveis, comerciais, ônibus e caminhões, os demais GEE diretos e indiretos não-CO₂ sofreram reduções no volume emitido no período apresentado. De forma semelhante ao HFC 134a, o material particulado emitido a partir do desgaste de pneus e pista aumentou, em decorrência do crescimento da frota circulante.

A próxima seção resume os indicadores estimados pelo experimento da presente tese.

5.3 Mensuração, Relato e Verificação

Os indicadores de MRV selecionados são baseados nos produtos da desagregação espacial *tier 1*, uma vez que, nesta tese, foi a única abordagem que modelou todos as entidades subnacionais brasileiras. Mesmo assim, os indicadores refletem apenas um potencial preliminar de obtenção de dados via *tier 1*, uma vez que outros direcionadores de emissões atmosféricas podem ser estimados, como intensidade energética em função da atividade de transporte, caso haja novas rodadas de coleta e tratamento de dados.

Outrossim, caso o procedimento de desagregação espacial *tiers 2 e 3* modelasse as demais entidades subnacionais, poderiam ser estimados outros indicadores como taxa de motorização, penetração de frota por categoria e tecnologia, emissões de GEE e poluentes atmosféricos por categoria e tecnologia etc. Contudo, por ser um método mais robusto, seria necessário conduzir mais rodadas de coleta de dados e verificação de consistência, por exemplo, para o balanceamento de frota, a estimativa da ‘curva flex’ e a estimativa intensidade de uso por entidade subnacional (caso disponível localmente).

Isto posto, a Tabela 5.11 sumariza os indicadores de MRV estimados pelo procedimento desenvolvido nesta tese para o ano de 2021. Os anos de 2005, 2010 e 2015 estão disponíveis no Apêndice B. Considerando o procedimento de desagregação *tier 1*, apesar de as emissões de GEE diretos serem modeladas por gás, optou-se por apresentar somente o indicador em unidades equivalentes ao dióxido de carbono (CO₂e), visando enfatizar os dados mais relevantes para análise.

Tabela 5.11. Indicadores de MRV por entidade subnacional (ano 2021)

Dados desagregados		AC	AL	AP	AM	BA	CE	DF	ES	GO	MA	MT	MS	MG	PA	PB	PR	PE	PI	RJ	RN	RS	RO	RR	SC	SP	SE	TO	Total
Geral	População (milhões)	0,9	3,4	0,9	4,3	15,0	9,2	3,1	4,1	7,2	7,2	3,6	2,8	21,4	8,8	4,1	11,6	9,7	3,3	17,5	3,6	11,5	1,8	0,7	7,3	46,6	2,3	1,6	213
	PIB (bilhões)	18	68	20	124	328	179	285	149	240	115	192	132	732	232	75	523	207	60	809	77	505	55	17	375	2.550	49	47	8.162
Emissões (Gg CO ₂ e)	Rodoviário	563	1.500	573	2.903	10.345	4.658	2.570	4.347	7.870	4.819	5.378	4.069	20.484	6.011	2.100	16.516	5.966	2.018	10.559	2.090	12.376	2.413	1.332	10.735	41.655	1.286	3.035	188.168
	<i>Individual motorizado</i>	240	765	328	1.053	3.599	2.309	1.733	1.815	2.264	1.656	1.074	1.190	6.572	2.147	1.152	4.967	2.301	929	5.664	1.038	5.757	763	289	4.965	15.637	637	638	71.483
	<i>Coletivo</i>	30	277	34	236	1.278	539	331	426	603	273	253	305	2.289	479	227	1.227	705	228	1.401	228	1.095	140	35	599	4.969	194	134	18.534
	<i>Distribuição</i>	47	121	38	161	741	396	292	369	702	234	311	446	2.023	324	171	1.423	434	169	938	189	1.260	175	48	932	4.595	98	125	16.762
	<i>Transferência</i>	245	337	173	1.454	4.727	1.414	214	1.738	4.301	2.656	3.740	2.128	9.600	3.061	549	8.899	2.527	691	2.556	635	4.264	1.335	959	4.239	16.454	356	2.137	81.390
	Aéreo	28	134	12	310	369	345	649	57	159	64	109	42	365	254	77	231	636	35	527	146	190	69	38	90	2.706	35	20	7.696
	Ferroviário	0	0	0	0	6	3	9	40	42	36	286	39	921	1.474	0	91	0	0	22	0	24	0	0	2	135	0	66	3.197
	Aquático	0	0	5	234	203	75	0	260	33	612	0	0	0	1.333	3	29	179	0	38	0	165	374	0	83	36	0	0	3.662
	Dutoviário	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total (Transportes)	590	1.634	589	3.447	10.924	5.081	3.228	4.705	8.104	5.531	5.773	4.150	21.770	9.071	2.180	16.867	6.781	2.053	11.145	2.236	12.755	2.856	1.370	10.911	44.533	1.321	3.120	202.724
	Rodoviário	218	621	225	1.175	4.151	1.875	1.085	1.687	3.720	1.844	2.422	1.614	8.929	2.310	892	6.710	2.397	821	4.416	851	4.777	927	491	4.158	20.286	518	1.132	80.250
	<i>Individual motorizado</i>	104	359	138	511	1.758	1.041	788	790	1.734	723	901	594	4.000	924	556	2.619	1.098	434	2.674	476	2.430	326	123	2.115	11.065	287	284	38.850
<i>Coletivo</i>	11	99	12	85	459	194	119	153	216	98	91	109	822	172	82	440	253	82	503	82	393	50	13	215	1.784	70	48	6.653	
<i>Distribuição</i>	17	43	14	57	262	140	104	131	248	83	110	158	716	115	61	504	154	60	332	67	446	62	17	330	1.627	35	44	5.934	
<i>Transferência</i>	87	120	62	522	1.672	500	75	614	1.521	940	1.321	753	3.391	1.099	194	3.147	893	245	908	226	1.508	488	339	1.498	5.811	126	756	28.814	
Aéreo	9	44	4	103	122	114	215	19	53	21	36	14	121	84	25	77	211	12	175	48	63	23	13	30	897	12	7	2.552	
Ferroviário	0	0	0	0	12	1	6	13	14	12	93	13	301	480	0	30	4	0	47	0	12	0	0	1	153	0	21	1.213	
Aquático	0	0	1	74	62	23	0	80	10	187	0	0	0	412	1	9	55	0	12	0	51	119	0	25	11	0	0	1.132	
Dutoviário	0	0	0	7	12	0	23	0	1	0	0	0	6	0	0	5	0	0	12	0	4	0	0	4	42	0	0	115	
Total (Transportes)	228	665	230	1.358	4.359	2.013	1.329	1.799	3.797	2.064	2.552	1.640	9.357	3.285	919	6.830	2.667	833	4.662	899	4.906	1.068	504	4.218	21.390	529	1.160	85.262	
Indicadores	Energia per capita (tep/hab.)	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,5	0,3	0,7	0,6	0,4	0,4	0,2	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,8	0,6	0,5	0,2	0,7	0,4
	Intensidade carbono (gCO ₂ e/MJ)	62	59	61	61	60	60	58	62	51	64	54	60	56	66	57	59	61	59	57	59	62	64	65	62	50	60	64	57
	Carbono per capita (tCO ₂ e/hab.)	0,7	0,5	0,7	0,8	0,7	0,5	1,0	1,1	1,1	0,8	1,6	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	0,7	0,6	0,6	0,6	1,1	1,6	2,1	1,5	1,0	0,6	1,9	1,0
	Carbono por PIB (gCO ₂ e/R\$)	33	24	30	28	33	28	11	32	34	48	30	32	30	39	29	32	33	34	14	29	25	52	80	29	17	27	67	25
	Renováveis (%)	16%	20%	19%	18%	19%	18%	20%	15%	31%	14%	28%	18%	25%	13%	23%	20%	18%	20%	18%	19%	15%	14%	13%	16%	32%	19%	14%	23%
	Fósseis (%)	84%	80%	81%	82%	81%	82%	80%	85%	69%	86%	72%	82%	75%	87%	77%	80%	82%	80%	82%	81%	85%	86%	87%	84%	68%	81%	86%	77%
	Diesel (%)	45%	35%	49%	48%	49%	37%	20%	45%	48%	49%	57%	56%	50%	54%	33%	54%	44%	42%	34%	37%	43%	60%	66%	44%	38,91%	39,05%	67%	45%
	Gasolina %	34%	37,2%	46%	25%	27%	37,0%	42%	33%	19%	26%	13%	23%	22%	21%	41%	23%	28%	36%	22%	37%	37%	23%	19%	38%	23%	39%	18%	26%

Fonte: autor.

Os principais direcionadores dos resultados por estado apresentados na Tabela 5.11 foram analisados na seção 5.2. Nessa linha, foram endereçadas as análises de:

- Consumo por modo e atividade;
- Emissões por modo e atividade;
- Intensidade de carbono (tCO₂e/hab.);
- Consumo de renováveis (%);
- Consumo de fósseis (%);
- Dependência do Diesel mineral (%); e
- Dependência da gasolina mineral (%).

Os indicadores ‘Energia per capita’ (tep/hab.), ‘Carbono *per capita*’ (tCO₂e/hab.) e ‘Carbono por PIB (gCO₂e/R\$.) apresentam os resultados de energia e emissão sob as óticas demográfica e econômica dos estados. Considerando os três indicadores, o estado de RR se destaca com resultados mais intensivos do país, ou seja, 0,77 tep/hab. (Energia *per capita*), 2,1 tCO₂e/hab. (Carbono *per capita*) e 80 gCO₂e/R\$. (Carbono por PIB).

Não obstante, conforme visto na seção 5.2.1, o PA é estado brasileiro com maior intensidade de carbono (65,9 gCO₂e/MJ), com RR em segundo (64,9 gCO₂e/MJ). Isso aponta que indicadores absolutos não necessariamente refletem o avanço de uma localidade em direção a uma meta. Como o PA apresenta uma maior participação de combustíveis fósseis, a sua intensidade de carbono é superior à de RR, mesmo emitindo menos carbono por habitante ou por unidade monetária produzida.

Enfim, os indicadores propostos na Tabela 5.11 para uma estrutura de MRV podem ser incorporados a políticas públicas locais, auxiliando no processo de estabelecimento de metas tangíveis e no relato às partes interessadas. Por serem oriundos de um mesmo inventário (nacional), os desempenhos são comparáveis, evitando distorções em função de bases de dados e métodos próprios adotados em cada estado. A próxima seção apresenta as conclusões do Capítulo 5.

5.4 Considerações do Capítulo 5

Este capítulo apresentou e analisou os resultados do experimento de aplicação dos procedimentos de desagregação espacial *tier 1* e *tiers 2* e 3. Além disso, os dados formam sumarizados em indicadores passíveis de serem utilizados em estruturas de MRV, visando comparar e relatar desempenhos entre as entidades subnacionais.

Visando prover a maior quantidade de informações possíveis, optou-se por modelar o inventário nacional, adotando o mesmo método da 4ª Comunicação Nacional (Brasil, 2020). Com isso, foi possível utilizar plenamente dados que, usualmente, não são divulgados em relatórios, como ‘curva flex’, frota circulante por tecnologia, atividade de transporte de passageiros e carga etc. Tais dados são importantes não apenas para separar o consumo energético em setores econômicos, modos de transporte e tipo de atividade (passageiros e carga), na desagregação espacial *tier 1*, como para reproduzir uma abordagem *bottom-up*, com a consistência metodológica do inventário nacional, na desagregação *tiers 2 e 3*.

A consistência dos resultados de ambos os procedimentos foi validada por 12 relatórios de referência de 9 entidades subnacionais, com poucos ajustes em combustíveis de menor impacto no consumo. Em nenhuma entidade subnacional, a diferença média identificada tanto no consumo energético como nas emissões atmosféricas superou 8% em relação a relatórios de referência locais.

Apesar da aplicação dos procedimentos ser realizada com dados do Brasil, o método pode ser aplicado em qualquer país, desde que haja um inventário nacional, balanço ou matriz energética com resultados dispostos por setor da economia, preferencialmente subdividido por modo de transporte. A alocação da energia consumida entre os setores, modos e entidades subnacionais irá depender também da disponibilidade de dados locais, preferencialmente oriundos de poucas bases, mas consistentes.

A próxima seção discorre sobre as considerações finais da tese e implicações.

Considerações finais e implicações

A presente tese teve como objetivo desagregar espacialmente inventários de uso de energia e emissões atmosféricas do setor de transportes, suportando estruturas de MRV subnacionais. Para isso, foi desenvolvido e aplicado um procedimento de desagregação espacial baseado em múltiplas camadas de detalhamento. Preliminarmente, foram discutidos os principais pressupostos teórico-metodológicos em inventários nacionais e estruturas de MRV (Capítulo 2). Em especial, discorreu-se sobre as abordagens de cálculo e seus níveis de detalhamento (*tiers*), as especificidades dos GEE diretos e indiretos, bem como os diversos setores da economia convencionalmente inventariados.

Portanto, o Capítulo 2 endereçou o Objetivo Específico 1, ‘*identificar como relacionar estruturas de MRV e inventários nacionais de consumo energético e emissões atmosféricas*’. Ademais, a exposição da base científica foi importante para uma melhor compreensão dos requisitos preliminares da desagregação espacial, sobretudo quanto às iterações entre setores econômicos, *bunker*, e modos de transporte, bem como da escolha por procedimentos estruturados em *tiers*.

O caráter inovador do procedimento foi baseado no preenchimento de lacunas do conhecimento identificadas por meio de revisões sistemática e documental em desagregação espacial e indicadores de estruturas de MRV (Capítulo 3). As revisões também permitiram a identificação e seleção de variáveis *proxy* para balanceamento da energia e atividade entre setores, *bunker*, e modos de transportes, bem como de protocolos de análise de consistência dos resultados. Então, o Capítulo 3 atendeu aos objetivos 2 e 3 desta pesquisa, especificamente:

- *Identificar e selecionar os indicadores de MRV que podem ser utilizados para a avaliação do histórico e das estimativas desagregadas do setor;*
- *Identificar e selecionar variáveis proxy para alocar o consumo energético em entidades subnacionais.*

Em síntese, as revisões conduzidas apontam lacunas quanto a existência de estudos de desagregação que abrangem:

- Um inventário nacional *bottom-up*, *tier 2* (CO₂) e *tier 3* (gases não-CO₂), com a linha de base de atividade, energia e emissões dos cinco modos de transporte convencionalmente presentes em países territorialmente vastos;

- Um modelo de desagregação da linha de base por modo de transporte e tipo de atividade (passageiros e carga), incluindo protocolo de abatimento de emissões de setores não-transportes e *bunker*;
- Um modelo de desagregação de GEE diretos e indiretos, além de poluentes atmosféricos, baseados em múltiplas variáveis *proxies* a nível de energia e atividade;
- Um protocolo de verificação de consistência baseado em inventários, matrizes ou balanços energéticos estaduais; e
- Indicadores desagregados que possam ser incorporados a estruturas de MRV estaduais, com aderência a indicadores de MRV do país (soma zero).

Por conseguinte, as lacunas dessas pesquisas subsidiaram o desenvolvimento do procedimento de desagregação espacial das estimativas nacionais (Capítulo 4), permitindo um nível de detalhamento, até então, inédito.

A camada *tier* 1 desagrega inventários e calcula as emissões atmosféricas em função do consumo de energia por setor da economia, modo de transporte, tipo de atividade e subatividade. As camadas *tiers* 2 e 3 desagregam inventários e calculam as emissões atmosféricas em função do consumo de energia (CO₂), bem como da atividade produzida (GEE não-CO₂ e poluentes atmosféricos). O Capítulo 4 endereçou o Objetivo Específico 4, ‘*desenvolver um procedimento de desagregação espacial de inventários de uso de energia e emissões atmosféricas do setor de transportes, suportando estruturas de MRV subnacionais*’.

O modelo foi aplicado em um inventário nacional de emissões atmosféricas, desagregando-o em 27 entidades subnacionais. Ao todo, foram geradas 61 matrizes de dados de setores econômicos e modos de transportes, tanto para desagregar o consumo doméstico como *bunker*.

Visando obter a maior quantidade de dados possíveis, como ‘curva flex’, frota circulante por tecnologia, intensidade de uso etc., optou-se por modelar um novo inventário nacional a partir do procedimento adotado na 4^a Comunicação Nacional do Brasil à UNFCCC. Esse passo adicional foi importante, para efeito de pesquisa, uma vez que a revisão sistemática apontou para resultados de desagregações insatisfatórios, parte das limitações possivelmente causadas por inventários nacionais pouco detalhados.

Assim, modelar previamente um inventário nacional permitiu a plena aplicação do procedimento de desagregação espacial *tiers* 2 e 3 no estado de SP. Contudo, ressalta-

se que o cálculo do inventário nacional, ampliando a linha de base da 4ª Comunicação Nacional para 2021, foi possível principalmente pela prévia experiência do pesquisador na elaboração da comunicação nacional. Para outros contextos, visando mitigar recursos e reduzir incertezas, sugere-se a desagregação de inventários previamente disponíveis ao público.

Os resultados desagregados foram comparados com 12 relatórios de referência de 9 entidades subnacionais, divididos em inventários, balanços e matrizes energéticas. Prioritariamente, a consistência foi analisada em função do uso de energia em balanços e matrizes energéticas. Na ausência dessa informação, foram analisadas emissões atmosféricas de CO₂e, por último, CO₂e. Ademais, estudos recentes e com longo histórico de linha de base foram analisados com maior precisão e, eventualmente, ajustes foram feitos em casos específicos, como o GNV no RJ e em SP e o óleo combustível em SP.

Em linhas gerais, a diferença identificada entre as desagregações e os diversos estudos locais não superou 8% no procedimento *tier 1* e 6% no procedimento *tiers 2 e 3*, o que evidencia a robustez das iterações de alocação. Logo, o Capítulo 5 endereçou o Objetivo Específico 5, *‘aplicar o procedimento, por meio de experimento, e analisar a consistência das informações e validar os resultados dos inventários modelados’*.

Mais além, os indicadores de MRV, estruturados por entidade subnacional, abrangem desde o uso de energia e emissões atmosféricas por modo de transporte e subatividade a indicadores de intensidades e de penetração por fonte energética. Para fins de simplificação, os resultados foram consolidados em CO₂e e em modos de transportes e subatividades, embora tenham sido produzidas informações detalhadas a nível de combustível e gás, estratificados em transporte de passageiros e carga.

Caso a aplicação da desagregação *tiers 2 e 3* fosse ampliada para todos os estados, outros dados importantes como taxa de motorização e emissões de GEE indiretos e poluentes atmosféricos seriam incorporados à tabela de indicadores de MRV. Pela maior disponibilidade de dados de frota e perfil de uso consistentes e de estudos locais para validação, restringiu-se a aplicação desse procedimento ao estado de SP.

A análise conduzida evidenciou diferenças estruturais entre os estados, por exemplo, quanto à dependência do Diesel mineral e da gasolina C, bem como quanto à penetração de energia renovável. Enquanto o Brasil apresentou uma dependência média do Diesel mineral de 45% em 2021, o DF apresentou apenas 20% no mesmo ano. Contudo, por apresentar características de área metropolitana, o DF reflete a maior

participação do transporte individual motorizado do país, implicando na segunda maior dependência de gasolina C (42%).

Outrossim, estados produtores e com menor preço médio do etanol hidratado apresentaram os maiores ganhos em intensidade de carbono até 2019. Contudo, tais estados foram mais impactados, considerando esse indicador, durante a pandemia de COVID-19.

A modelagem do GEE direto HFC evidenciou a necessidade de uma apreciação cautelosa ao considerar veículos elétricos como zero emissão, uma vez que isso ocorre apenas em relação ao uso da energia. As emissões de HFC ocorre principalmente com o sucateamento do veículo, seja por envelhecimento ou por acidentes. Além disso, a consideração do gás RCHO mostra que a política de aumento da mistura de biocombustíveis deve ser analisada em conjunto com medidas complementares, uma vez que esse poluente é emitido em grande volume a partir da queima de etanol.

Em síntese, entende-se que os resultados obtidos a partir das revisões conduzidas e do experimento conduzido responderam as questões de pesquisa previamente levantadas, bem como os objetivos geral e específicos.

Como implicações futuras da pesquisa, destacam-se:

- Atualização do procedimento utilizado pelo MCTI nas estimativas anuais do Brasil e comunicações nacionais à UNFCCC;
- Apontar possíveis erros em inventários de emissões atmosféricas estaduais, seja por erro em alocação da energia entre os setores econômicos e modos de transporte ou por dupla contagem da energia consumida em outro estado ou em outro período;
- Auxiliar no processo de precificação de carbono em ambientes regionais ou mesmo metropolitanos, carentes de métodos e dados consistentes;
- Auxiliar entidades subnacionais com medições consistentes, servindo como referência para calibração de estudos estaduais, na situação de escassez de dados locais; e
- Auxiliar entidades subnacionais no diagnóstico e desenvolvimento de políticas locais de enfrentamento da mudança do clima e de da concentração de poluentes;
- Desagregação do transporte aéreo a partir da abordagem *tier 3A*, mediante obtenção de dados junto à ANAC;

- Adaptar o método para municípios e regiões metropolitanas e verificar o aumento da incerteza. Nessa linha, desenvolver mecanismos para desagregar o transporte ativo de forma consistente.

Advoga-se que o procedimento desenvolvido promove uma estimativa mais acurada do que a soma dos estudos subnacionais, individualmente elaborados. Isso se justifica pelas diferentes abordagens metodológicas e disponibilidades de dados, interferindo no balanceamento dos setores, do consumo *bunker*/internacional e dos modos de transporte, além do cálculo do consumo e das emissões atmosféricas nas diversas segregações de atividades e subatividades possíveis.

Apesar de a aplicação ser realizada no Brasil, o procedimento pode ser utilizado em países com problemáticas distintas. A depender da disponibilidade local de informações, adota-se diferentes nível de detalhes das desagregações espaciais.

Referências

- ABLA – Associação Brasileira das Locadoras de Automóveis. **Anuário Brasileiro do Setor de Locação de Veículos 2022**. Disponível em: <<https://www.virapagina.com.br/abla2022/>>. Acesso em 01/01/2023.
- ABRACICLO – Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicycletas e Similares. **Dados do Setor 2022**. Disponível em: <<https://www.abraciclo.com.br/>>. Acesso em 01/01/2023.
- ALAM, M. S., DUFFY, P., HYDE, B., & MCNABOLA, A. **Improvement in the estimation and back-extrapolation of CO2 emissions from the Irish road transport sector using a bottom-up data modelling approach**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 56, 18-32. 2017.
- ALLEN, Myles R. *et al.* **IPCC fifth assessment synthesis report-climate change 2014 synthesis report**. 2014.
- ALTHOR, G.; WATSON, J. E. M.; FULLER, R. A. **Global mismatch between greenhouse gas emissions and the burden of climate change**. Scientific Reports, v. 6, p. 1–6, 2016.
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil**. Brasília, DF, Brasil, v. 1, 2019.
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. **Anuários estatísticos. Dados consolidados de 2022**. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas>>. Acesso em 01/01/2023.
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil – 2019. Ano Base 2018**. 2020. Volume único. 1ª Edição. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/inventario-nacional-de-emissoes_v6.pdf>. Acesso em 01/01/2023.
- ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. 2022. **Anuário da indústria automobilística Brasileira de 2022**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/tabelas.html>>. Acesso em 01/01/2023.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Vendas de derivados de petróleo e etanol 2022**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>>. Acesso em 01/01/2023.

- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Pesquisa de preços gasolina e etanol**. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-distribuiacao-combustiveis>>. 2023. Acesso em 01/01/2023.
- ANPTRILHOS – National Association of Passenger Carriers on Rails. **Propostas para o Avanço da Mobilidade Urbana Nacional**. 2018. Disponível em: <https://anptrilhos.org.br/>. Acesso em 01/01/2023.
- ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público - Simob/ANTP: Relatório geral 2018**. Disponível em: <http://www.antp.org.br/relatorios-a-partir-de-2014-nova-metodologia.html>. 2020. Acesso em 01/01/2023.
- BHUTTO, A. W. *et al.* **Progress in the production of biomass-to-liquid biofuels to decarbonize the transport sector-prospects and challenges**. RSC Advances, v. 6, n. 38, p. 32140–32170, 2016.
- BO, Y., CAI, H., & XIE, S. D. **Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China**. Atmospheric Chemistry and Physics, 8(23), 7297–7316. doi:10.5194/acp-8-7297-2008, 2008.
- BOOTH, Andrew; SUTTON, Anthea; PAPAIOANNOU, Diana. **Systematic approaches to a successful literature review**. Sage, 2016.
- BOYCHUK, P., BOYCHUK, K., NAHORSKI, Z., & HORABIK, J. **Spatial inventory of greenhouse gas emissions from the road transport in Poland**. ECONTECHMOD: An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes, 1, 9-15, 2012.
- BP. (2018). **Energy Outlook 2018**. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>. Acesso em 01/01/2023.
- BRASIL, MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **‘Greenhouse gas emissions inventory from mobile sources in the energy sector.’** (in Portuguese: Emissões de gases de efeito estufa por fontes móveis, no setor energético). Brazilian Ministry of Science and Technology, Brasília, 2002, pp. 25-26.
- BRASIL, MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. Relatórios de

- Referência: Emissões de Gases de Efeito Estufa no Transporte Rodoviário, Brasília 2010.
- BRASIL, MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do clima**. MCTI, Brasília, DF, Brasil, v. 2, 2016.
- BRASIL, MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do clima**. MCTI, Brasília, DF, Brasil, v. 1, 2020.
- BRASIL, MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Resultados do Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa por Unidade Federativa**. MCTI, Brasília, DF, Brasil, v. 1, 2021.
- BRASIL, MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. 111p. 2011.
- BRASIL, MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 Ano base 2012 – Relatório Final**, Brasília, 2014.
- BRUNO F.; COVIELLO N.; DALLA CHIARA B.; DI PAOLA A.; PAGLIERO P.; VIKTOROV V. (2015). **The energy consumption of trains in operation: simulation, a methodology for the analysis and influence of the driving style / Il consumo energetico di treni in esercizio: simulazione, metodologia di analisi ed influenza dello stile di condotta**. In: INGEGNERIA FERROVIARIA, vol. LXX n. 4, pp. 327-357. - ISSN 0020-0956.
- BUENO, GORKA. **Analysis of scenarios for the reduction of energy consumption and GHG emissions in transport in the Basque Country**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 4, p. 1988-1998, 2012.
- BUENO, L., BARTRINA A. **Accounting Rules for the Achievement of Mitigation Objectives in Non-Annex I Countries**. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2017.
- BUN, R., HAMAL, K., GUSTI, M., & BUN, A. **Spatial GHG inventory at the regional level: accounting for uncertainty**. Climatic Change, 103(1-2), 227-244, 2010.
- BYGRAVE, Stephen; ELLIS, Jane. **Policies to reduce greenhouse gas emissions in industry: Successful approaches and lessons learned: workshop report**. OECD, 2003.

- CALIL SALLUM, Ana Maria; GARCIA, Dayse Maioli; SANCHES, Mariana. **Dor aguda e crônica: revisão narrativa da literatura**. Acta Paulista de Enfermagem, v. 25, n. 1, 2012.
- CAO, Y., ZHAO, Y., WANG, H., LI, H., WANG, S., LIU, Y., ... & ZHANG, Y. **Driving forces of national and regional carbon intensity changes in China: Temporal and spatial multiplicative structural decomposition analysis**. Journal of Cleaner Production, 213, 1380-1410, 2019.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Emissões veiculares no estado de São Paulo 2021. São Paulo: CETESB, 2022. ISBN 978-65-5577-013-1.
- CHEN, Z., NI, W., XIA, L., & ZHONG, Z. **Structural decomposition analysis of embodied carbon in trade in the middle reaches of the Yangtze River**. Environmental Science and Pollution Research, 26(1), 816-832, 2019.
- CLAPP, Christa; PRAG, Andrew. **Projecting Emissions Baselines for National Climate Policy**. 2012.
- CHINA, G. I. Z. **Draft MRV Blueprint for Urban Passenger Transport NAMAs**. 2015.
- CHINA, MEE – Ministry of Ecology and Environment. (2019). **The People's Republic of China Third National Communication on Climate Change**. Disponível em: < <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>>. Acesso em 01/01/2023.
- CHIZZOTTI, Antonio. **Pesquisa em ciências humanas e sociais**. Cortez editora, 2018.
- CLIMATE WATCH. Historical GHG Emissions. 2021. Washington, DC: World Resources Institute. Disponível em: < <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>>. Acesso em 01/01/2023.
- COLLINS, John A.; FAUSER, Bart CJM. **Balancing the strengths of systematic and narrative reviews**. 2005.
- CUENOT, Francois; FULTON, Lew; STAUB, John. **The prospect for modal shifts in passenger transport worldwide and impacts on energy use and CO₂**. Energy Policy, v. 41, p. 98-106, 2012.
- D'AGOSTO, M. A. GONÇALVES. D. N. S., OLIVEIRA., B. L. **Emissão de gases de efeito estufa - 2050: Implicações econômicas e sociais do cenário de plano governamental**. Rio de Janeiro: CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ, 2016. Disponível em: <<http://www.centroclima.coppe.ufrj.br/>>. Acesso em 01/01/2023.

- DANTAS, G., SICILIANO, B., FREITAS, L., DE SEIXAS, E. G., DA SILVA, C. M., & ARBILLA, G. (2019). **Why did ozone levels remain high in Rio de Janeiro during the Brazilian truck driver strike?** Atmospheric Pollution Research.
- DCCEEW – Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. **State and territory greenhouse gas inventories: annual emissions.** Disponível em: < <https://www.dcceew.gov.au/climate-change/publications/state-and-territory-greenhouse-gas-inventories>>. 2022. Acesso em 01/01/2023.
- DESSAI, Suraje; HULME, Mike. **Does climate adaptation policy need probabilities?** Climate policy, v. 4, n. 2, p. 107-128, 2004.
- DIMOVSKI, S. **Conceptual Framework for Monitoring, Reporting and Verification (MRV) of Climate Change Mitigation Actions in Macedonia.** Ministry of Environment and Physical Planning, 2014.
- EEA – European Environment Agency. **Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2019 and inventory report 2022,** 2022.
- EGGLESTON, Simon. **Overview of relevant methodologies in IPCC Guidelines and Good Practice Guidance. In: Presentation at the UNFCCC workshop on Methodological Issues relating to Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries.** Tokyo. 2008. p. 24-27.
- EIA – Energy Information Administration. **International Energy Outlook 2021.** 2021. Disponível em:< https://www.eia.gov/outlooks/ieo/tables_side_xls.php>. Acesso em 01/01/2023.
- EICHHORST, U., BONGARDT, D., FOUCHARD, B., & VERRY, D. **MobiliseYourCity-Monitoring & reporting approach for GHG emissions?.** MobiliseYourCity, 2017.
- EICHHORST, U., BONGARDT, D., CHINA, G. I. Z. **Draft MRV Blueprint for Urban Passenger Transport NAMAs.** 2015.
- EPA – US Environmental Protection Agency. **Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2020.** 2022.
- EPA – US Environmental Protection Agency. **Understanding Global Warming Potentials.** 2017. Disponível em:< <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>>. Acesso em 01/01/2023.

- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional - 2022. Ano Base 2021**, Ministério de Minas e Energia, DF, Brasil, 2022.
- EUROPEAN COMMISSION. Emission Database For Global Atmospheric Research (EDGAR v4.3.2). **Joint Research Centre (JRC)/PBL Netherlands Environmental Assessment Agency** <http://edgar.jrc.ec.europa.eu> (2016). Acesso em 01/01/2023.
- FERREIRA, J., GUEVARA, M., BALDASANO, J. M., TCHEPEL, O., SCHAAP, M., MIRANDA, A. I., & BORREGO, C. (2013). **A comparative analysis of two highly spatially resolved European atmospheric emission inventories**. *Atmospheric environment*, 75, 43-57.
- FRANCO, V., KOUSOULIDOU, M., MUNTEAN, M., NTZIACHRISTOS, L., HAUSBERGER, S. AND DILARA, P. (2013). **Road vehicle emission factors development: A review**. *Atmospheric Environment* 70:84-97
- FRASER, J., SWAMINATHAN, S., THOMPSON, L. **Energy use in the transport sector**. Disponível em: <http://ww.tgaassoc.com>. Acesso em 01/01/2023.
- FRIDEL E., SKÖLD. S. BÄCKSTRÖM. S. **Transport work and emissions in MRV; methods and potential use of data**. Lighthouse, 2018.
- FÜSSLER J. *et al.* **Reference Document on Measurement, Reporting and Verification in the Transport Sector**. Final Report. Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2016.
- FÜSSLER J. *et al.* **Reference Document on Transparency in the Transport Sector. Measurement, Reporting and Verification of Greenhouse Gas Emissions**. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2018.
- GASPARATOS, A.; EL-HARAM, M.; HORNER, M. **A longitudinal analysis of the UK transport sector, 1970-2010**. *Energy Policy*, v. 37, n. 2, p. 623–632, 2009.
- GKATZOFLIAS, D., MELLIOS, G., KOURIDIS, C., THEODOSOPOULOU, M., KLEANTHOUS, S., & SAMARAS, Z. **Spatial disaggregated emissions inventory for Cyprus**. In *Information Technologies in Environmental Engineering* (pp. 105-119). Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- GKATZOFLIAS, D., MELLIOS, G., & SAMARAS, Z. **Development of a web GIS application for emissions inventory spatial allocation based on open source software tools**. *Computers & Geosciences*, 52, 21-33, 2013.

- GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GOES, G. V., GONÇALVES, D. N. S., D'AGOSTO M. D. A., La ROVERE, E. L., BANDEIRA, R. A. M. **MRV framework and prospective scenarios to monitor and ratchet up Brazilian transport mitigation targets**. *Climatic Change*, v. 162, n. 4, p. 2197-2217, 2020a.
- GOES, G. V., GONÇALVES, D. N. S., D'AGOSTO M. D. A., BANDEIRA, R. A. M. GROTTERA, C. **Transport-energy-environment modeling and investment requirements from Brazilian commitments**. *Renewable Energy*, v. 157, p. 303-311, 2020b.
- GOES V. G. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA/Diset. **O fomento a tecnologias alternativas no transporte coletivo por ônibus para reduzir a evasão de usuários e ampliar a segurança energética nacional**. 2021. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br>. Acesso em 01/01/2023.
- GOES, G. V., Gonçalves, D. N. S. D'Agosto, M. A. Araldi, F. **Why electric mobility should be treated as the main instrument of transport climate policy in the next rounds of the Brazilian NDC**. Disponível em: <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2022/03/Policy-Brief-Transport-in-Brazil.pdf>. Acesso em 01/01/2023.
- GONÇALVES, D. N. S. **Elaboração de cenários prospectivos para o uso de energia e emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes - uma abordagem metodológica**. Rio de Janeiro, 2018.
- GONÇALVES, D. N. S., GOES, G. V., D'AGOSTO M. D. A., BANDEIRA, R. A. M. **Energy use and emissions scenarios for transport to gauge progress toward national commitments**. *Energy Policy*, v. 135, p. 110997, 2019a.
- GONÇALVES, D. N. S., GOES, G. V., D'AGOSTO M. D. A. **Transportes no Brasil – Panorama e Cenários Prospectivos para atendimento da Contribuição Nacionalmente Determinada**, 2019b.
- GRANT, S. P., MAYO-WILSON, E., MELENDEZ-TORRES, G. J., & MONTGOMERY, P. **Reporting quality of social and psychological intervention trials: a systematic review of reporting guidelines and trial publications**. *PloS one*, 8(5), e65442, 2013.

- GRIGORATOS, Theodoros; MARTINI, Giorgio. **Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM.** Report no. Report EUR, v. 26648, 2014.
- HAO, Yu; LIAO, Hua; WEI, Yi-Ming. **Is China's carbon reduction target allocation reasonable? An analysis based on carbon intensity convergence.** Applied energy, v. 142, p. 229-239, 2015.
- HAN, P., CAI, Q., ODA, T., ZENG, N., SHAN, Y., LIN, X., & LIU, D. **Assessing the recent impact of COVID-19 on carbon emissions from China using domestic economic data.** Science of the Total Environment, 750, 141688, 2021.
- HEROLD, A., MONNI, S., LIN, E., MEYER, C.P., FLUGSRUD, K., 2006. **Methodological choice and identification of key categories,** In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Institute For Global Environmental Strategies, Japan.
- HILLER, R. V., BRETSCHER, D., DELSONTRO, T., DIEM, T., EUGSTER, W., HENNEBERGER, R., ... & KÜNZLE, T. **Anthropogenic and natural methane fluxes in Switzerland synthesized within a spatially explicit inventory.** Biogeosciences, 11(7), 1941-1959, 2014.
- ICAT – Initiative for Climate Action Transparency (2020). **Sustainable Development Methodology: Assessing the Environmental, Social and Economic Impacts of Policies and Actions.** D. Rich, R. Song and K.H. Olsen eds. Washington D.C.: World Resources Institute; Copenhagen: UNEP DTU Partnership.
- IODICE, Paolo; SENATORE, Adolfo. **Atmospheric pollution from point and diffuse sources in a National Interest Priority Site located in Italy.** Energy & Environment, v. 27, n. 5, p. 586-596, 2016.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996; HOUGHTON, J. T. Revised 1996 IPCC **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Greenhouse Gas Inventory Workbook.** OECD, 1996.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006, **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme,** Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014: Climate Change 2014: **Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core

- Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change** [Core Writing Team, Masson-Delmotte, Valérie *et al*, 2021.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change** [Core Writing Team, Skea, J. *et al*, 2022.
- JAIN, Suresh *et al*. **Vehicular exhaust emissions under current and alternative future policy measures for megacity Delhi, India**. Journal of Transport & Health, v. 3, n. 3, p. 404-412, 2016.
- KAYGUSUZ, K. **Energy for sustainable development: A case of developing countries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 2, p. 1116–1126, 2012.
- KIM, Y. K., LEE, J. Y., RHEE, Y., & CHUN, Y. Y. (2017). **Country-specific greenhouse gas emission factors of diesel-electric locomotive in Korea**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 57, 74-83.
- KITCHENHAM, B., BRERETON, O. P., BUDGEN, D., TURNER, M., BAILEY, J., & LINKMAN, S. **Systematic literature reviews in software engineering—a systematic literature review**. Information and software technology, 51(1), 7-15, 2009.
- KRUYT, B. *et al*. **Indicators for energy security**. Energy Policy, v. 37, n. 6, p. 2166–2181, 2009.
- LA NOTTE, Alessandra; TONIN, Stefania; LUCARONI, Greti. **Assessing direct and indirect emissions of greenhouse gases in road transportation, taking into account the role of uncertainty in the emissions inventory**. Environmental Impact Assessment Review, v. 69, p. 82-93, 2018.
- LA ROVERE, E. L. **Avaliação dos compromissos da nova versão da 1ª NDC do Brasil**
In Caio Borges; Caroline Dihl Prolo; Emilio Lèbre La Rovere; organizado por Instituto Clima e Sociedade (2021): Análise Científica e Jurídica da nova Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) Brasileira ao Acordo de Paris. Rio de Janeiro/RJ - Brasil, p. 6-22, 2021.

- LARSEN, Hogne N.; HERTWICH, Edgar G. **The case for consumption-based accounting of greenhouse gas emissions to promote local climate action.** *Environmental Science & Policy*, v. 12, n. 7, p. 791-798, 2009.
- LEE, Sinwoo; NOH, Dong-Woon; OH, Dong-hyun. **Characterizing the Difference between Indirect and Direct CO₂ Emissions: Evidence from Korean Manufacturing Industries, 2004–2010.** *Sustainability*, v. 10, n. 8, p. 2711, 2018.
- LENZEN, Manfred. **Double-counting in life cycle calculations.** *Journal of Industrial Ecology*, v. 12, n. 4, p. 583-599, 2008.
- LIU, Z., MAO, X., & SONG, P. **GHGs and air pollutants embodied in China's international trade: Temporal and spatial index decomposition analysis.** *PLoS one*, 12(4), e0176089, 2017.
- MAES, J., VLIEGEN, J., VAN DE VEL, K., JANSSEN, S., DEUTSCH, F., DE RIDDER, K., & MENSINK, C. (2009). **Spatial surrogates for the disaggregation of CORINAIR emission inventories.** *Atmospheric Environment*, 43(6), 1246–1254. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.11.040
- MINAYO, Maria Cecilia de S.; SANCHES, Odécio. **Quantitativo-qualitativo: oposição ou complementaridade?** *Cadernos de saúde pública*, v. 9, p. 237-248, 1993.
- MELILLO, Jerry M. *et al.* **Indirect emissions from biofuels: how important?** *science*, v. 326, n. 5958, p. 1397-1399, 2009.
- MYHRE, Gunnar *et al.* **Anthropogenic and natural radiative forcing.** *Climate change*, v. 423, p. 658-740, 2013.
- NOBRE, C. MARENGO, J (Orgs.). **Mudanças Climáticas em Rede: um olhar interdisciplinar.** São José dos Campos: INCT, 2017).
- NIEDERBERGER, A. A.; KIMBLE, M. **MRV under the UN climate regime: paper tiger or catalyst for continual improvement?** *Greenhouse Gas Measurement and Management*, v. 1, n. 1, p. 47–54, 2011.
- NTU – Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (2022). **Anuário 2021-2022.** Disponível em: <https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub637956588268708311.pdf>. Acesso em: 01/01/2023;

- OICA – International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. **Motorization rate 2015 – Worldwide**. Disponível em: <https://www.oica.net/world-vehicles-in-use-all-vehicles-2/>. Acesso em: 01/01/2023.
- OLIVEIRA, T. D., GURGEL, A. C., & TONRY, S. (2020). **The effects of a linked carbon emissions trading scheme for Latin America**. *Climate Policy*, v. 20, n. 1, p. 1-17, 2020.
- OSML – Observatório de Sustentabilidade em Mobilidade e Logística. Indicadores do setor de transportes. Disponível em: <https://www.osml.eco.br>. Acesso em: 01/01/2023.
- PBMC, 2014: **Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas** [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp.
- PERDIGÃO, Dulce Mantella; HERLINGER, Maximiliano; WHITE, Oriana Monarca (Ed.). **Teoria e prática da pesquisa aplicada**. Elsevier, 2012.
- RAHMAN, Farahiyah Abdul *et al.* **Pollution to solution: Capture and sequestration of carbon dioxide (CO₂) and its utilization as a renewable energy source for a sustainable future**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 71, p. 112-126, 2017.
- ROBERTSON, Kerstin; JÄGERBRAND, Annika; ERIKSSON, Jan. **Regional Transport Indicators Used in Sweden for Measurement, Reporting and Verification of CO₂ Emissions**. *Challenges*, v. 6, n. 1, p. 55-70, 2015.
- ROTHER, Edna Terezinha. **Revisão sistemática X revisão narrativa**. *Acta paulista de enfermagem*, v. 20, n. 2, p. v-vi, 2007.
- ROWLEY, J.; SLACK, F. **Conducting a literature review**. *Management Research News* 2004, 27, 31-39.
- SAIDI, K.; HAMMAMI, S. **The impact of CO₂ emissions and economic growth on energy consumption in 58 countries**. *Energy Reports*, v. 1, p. 62–70, 2015.
- SAIKAWA, E., KIM, H., ZHONG, M., AVRAMOV, A., ZHAO, Y., JANSSENS-MAENHOUT, G., ... & HOROWITZ, L. W. **Comparison of emissions inventories of anthropogenic air pollutants and greenhouse gases in China**. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(10), 6393-6421, 2017.

- SARR, Babacar. **Nine success factors, for an efficient and transparent MRV system, within the framework of the Paris Agreement (2015 Climate Conference)**. Carbon Management, v. 9, n. 4, p. 361-366, 2018.
- SHANI, David; CHALASANI, Sujana. **Exploiting niches using relationship marketing**. Journal of consumer marketing, v. 9, n. 3, p. 33-42, 1992.
- SHARMA, Sudhir; DESGAIN, Denis DR. **Understanding the concept of nationally appropriate mitigation action**. UNEP Risø Centre on Energy, Climate and Sustainable Development. Department of Management Engineering. Technical University of Denmark (DTU), 2013.
- SCHIPPER, L., MARIE-LILLIU, C., AND GORHAM, R. 2000, **Flexing the Link between Carbon Emissions and Transportation**. World Bank Environment Division.
- SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Distrito Federal (2021a). **Inventário do Distrito Federal de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa 2005-2018**. Brasília, janeiro de 2021. Disponível em: < <https://www.sema.df.gov.br/inventario-de-gee-do-df/> >. Acesso em: 01/01/2023.
- SENATRAN – Secretaria Nacional de Trânsito. Departamento Nacional de Trânsito. **Frota por UF e Tipo de Veículo**. Disponível em: <<http://new.denatran.gov.br/>>. 2023. Acesso em 01/01/2023.
- SIEGL, W.O., T.J. WALLINGTON, M.T. GUENTHER, T. HENNEY, D. PAWLAK, M. DUFFY, 2002: **R-134a emissions from vehicles**. – Environ. Sci. Technol. 36, 561–566
- SINGH, N.; FINNEGAN, J.; LEVIN, K. **Mrv 101: Understanding Measurement, Reporting, and Verification of Climate Change Mitigation**. Understanding Measurement, v. 101, n. August, p. 1–28, 2016.
- SREEKANTH, K. J. **Review on integrated strategies for energy policy planning and evaluation of GHG mitigation alternatives**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64, 837-850, 2016.
- STARGARDTER, G., BOADLE, A (2019). **Brazil farm lobby wins as Bolsonaro grabs control over indigenous lands**. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-brazil-politics-agriculture/brazil-farm-lobby->

wins-as-bolsonaro-grabs-control-over-indigenous-lands-idUSKCN1OW0OS.

Acesso em: 01/01/2023.

BOADLE A.; STARGARDTER G., **Far-Right Bolsonaro Rides Anti-Corruption Rage to Brazil Presidency**. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-brazil-election-idUSKCN1N203K>. Acesso em: 01/01/2023.

TREANTON, K. *et al.* Reference approach. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. Kanagawa: Intergovernmental Panel on Climate Change–IPCC, p. 5-6, 2006.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2003) **Report of the Conference of the Parties on its Eighth Session, held at New Delhi** from 23 October to 1 November 2002. FCCC/CP/2002/7/Add.2, Decision 17/CP.8, Bonn. Disponível em: unfccc.int/resource/docs/cop8/07a02.pdf. Acesso em 01/01/2023.

UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. **Manual sobre Mensuração, Relato e Verificação para Países em Desenvolvimento**. Disponível em: <https://www.transparency-partnership.net/>. Acesso em 01/01/2023.

UNITED NATIONS. **World Urbanization Prospects 2018**. 2018. Disponível em: <<https://population.un.org/wup>>. Acesso em 01/01/2023.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Emissions gap report 2021**. UN Environment Programme, 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/>. Acesso em 01/01/2023.

UNTERSTELL, N. *et al.* **Climate and Development: Visions for Brazil 2030**. Disponível em: <https://www.institutotalanoa.org/documentos>. Acesso em 01/01/2023.

URPELAINEN, J.; VAN DE GRAAF, T. **United States non-cooperation and the Paris agreement**. *Climate Policy*, v. 18, n. 7, p. 839–851, 2018.

VIEWEG, Marion. **Bottom-Up GHG Inventory and MRV of Measures**. 2017.

VILAÇA, Márcio Luiz Corrêa. **Pesquisa e ensino: considerações e reflexões**. *Revista e-escrita*: Revista do Curso de Letras da UNIABEU, v. 1, n. 2, p. 59-74, 2010.

WALDRON, D. *et al.* **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories–Chapter 3: Mobile Combustion, Volume 2: Energy**. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan, 2006.

- WANG, R.; JIANG, Z. **Energy consumption in China's rural areas: A study based on the village energy survey**. *Journal of Cleaner Production*, v. 143, n. 2016, p. 452–461, 2017.
- WANG, W. W.; ZHANG, M.; ZHOU, M. **Using LMDI method to analyze transport sector CO₂ emissions in China**. *Energy*, v. 36, n. 10, p. 5909–5915, 2011.
- WAYNE, G. P. **The beginner's guide to representative concentration pathways**. *skeptical science*, v. 25, 2013.
- WBCSD (World Business Council for Sustainable Development), WRI (World Resource Institute). **The Green House Gas Protocol. A corporate accounting and reporting standard**. Revised ed. USA: Earthprint Limited; 2004.
- WOHLIN, Claes. **Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering**. In: *Proceedings of the 18th international conference on evaluation and assessment in software engineering*. ACM, 2014. p. 38.
- ZASINA, Damian; ZAWADZKI, Jaroslaw. **Spatial surrogate for domestic combustion's air emissions: A case study from Silesian Metropolis, Poland**. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 67, n. 9, p. 1012-1019, 2017.
- ZHENG, Chenghang *et al.* **Quantitative assessment of industrial VOC emissions in China: Historical trend, spatial distribution, uncertainties, and projection**. *Atmospheric environment*, v. 150, p. 116-125, 2017.

Apêndice A: Workshop e discussão com especialistas

Em 2019, foi realizado o ‘IV Workshop Cenários Prospectivos para Uso de Energia em Transportes’ (IV WCPUET) na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) com a presença de 32 especialistas e um público total de 40 pessoas. O evento contou com representantes de grandes empresas, Governo Federal e Estadual, academia e sociedade civil.

Trata-se do quarto de uma sequência de eventos que estabelece uma rotina anual de discussão sobre o principal desafio da sociedade para o século XXI: aplicar o conceito de sustentabilidade ao uso de energia para os transportes. Na ocasião do IV WCPUET, foram tratados os possíveis caminhos do setor de transportes que auxiliarão no atendimento da Contribuição Nacional Determinada (NDC). Além disso, ratificou-se com especialistas: (i) ajuste nos rendimentos energéticos do transporte rodoviário na categoria caminhões; (ii) ajuste nos coeficientes de calibração das funções de sucateamento do transporte rodoviário; (iii) desagregação de inventários nacionais; e (iv) medidas de mitigação e níveis de ambição para indicadores do setor até o ano de 2030. Para efeito deste estudo, validou-se uma versão preliminar do procedimento para desagregação espacial em entidades subnacionais.

Dentre as empresas participantes que atuam direta ou indiretamente no setor de transportes, destacam-se: Netz Engenharia Automotiva, Petrobrás e Scania. O Governo Federal esteve presente por meio da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). O Governo Estadual esteve presente por meio de representantes do Instituto Estadual do Ambiente (INEA).

A academia foi representada pelos Programas de Engenharia de Transportes (PET) e Planejamento Energético (PPE) da COPPE/UFRJ, pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia (IME) e pelo Laboratório de Transportes (Lastran) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Representantes da GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*), Greenpeace, INEA (Instituto Estadual do Ambiente), ITDP (*Institute for Transportation and Development Policy*) e do SEST/SENAT (Serviço Social do Transporte/Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte) também compareceram ao evento.

A Tabela A.1 mostra as instituições que participaram do evento realizado e contribuíram com a melhoria das estimativas. Representam uma vasta parcela dos *stakeholders* do setor de transportes, garantindo a confiabilidade dos modelos e dos estudos conduzidos pelo grupo de trabalho.

Tabela A.1. Principais instituições e empresas participantes do IV WCPUET

Instituições	Sigla
Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis	ANP
Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia	COPPE
Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes	ANPET
Banco Nacional do Desenvolvimento	BNDES
<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i>	GIZ
<i>Greenpeace</i>	
Instituto Estadual do Ambiente	INEA
Instituto Militar de Engenharia	IME
Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada	IPEA
Ministério das Cidades/ Ministério do Desenvolvimento Regional	
NETZ Engenharia Automotiva	
Petrobrás	
Scania	
Serviço Social do Transporte e Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte	SEST SENAT
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	UFRGS
Universidade Federal do Rio de Janeiro	UFRJ

Fonte: autor.

Apêndice B: Indicadores por entidade subnacional

Tabela B.1. Indicadores de MRV por entidade subnacional (ano 2015)

Dados desagregados	AC	AL	AP	AM	BA	CE	DF	ES	GO	MA	MT	MS	MG	PA	PB	PR	PE	PI	RJ	RN	RS	RO	RR	SC	SP	SE	TO	Total
Geral																												
População (milhões)	0,8	3,3	0,8	3,9	15,2	8,9	2,9	3,9	6,6	6,9	3,3	2,7	20,9	8,2	4,0	11,2	9,3	3,2	16,6	3,4	11,2	1,8	0,5	6,8	44,4	2,2	1,5	204
PIB (bilhões)	18	62	19	116	329	175	289	161	233	105	144	111	696	176	75	505	210	52	884	77	512	49	14	334	2.601	52	39	8.039
Rodoviário	593	1.519	860	3.409	10.308	4.700	3.006	3.830	7.913	4.430	4.192	3.288	20.614	5.602	2.238	13.704	5.962	2.215	13.470	2.454	12.472	1.856	513	9.410	42.953	1.414	2.474	185.400
<i>Individual motorizado</i>	243	740	266	1.069	3.569	2.315	1.963	1.602	2.579	1.536	993	1.161	7.556	1.955	1.150	4.591	2.401	1.003	6.744	1.121	6.125	722	214	4.479	16.713	679	603	74.091
<i>Coletivo</i>	30	281	34	268	1.398	589	378	487	665	274	270	309	2.519	511	249	1.340	804	203	1.863	243	1.296	144	36	658	5.894	214	148	21.107
<i>Distribuição</i>	40	101	32	150	605	343	248	314	602	186	260	336	1.613	251	145	1.239	394	134	857	154	1.056	139	36	737	4.106	83	104	14.265
<i>Transferência</i>	281	397	528	1.922	4.736	1.453	417	1.428	4.068	2.434	2.669	1.482	8.926	2.885	694	6.534	2.363	875	4.005	937	3.995	851	227	3.536	16.239	437	1.621	75.937
Aéreo	27	129	14	355	668	514	1.190	110	223	126	208	109	649	392	126	513	490	62	1.269	215	407	74	20	268	2.782	72	21	11.030
Ferroviário	0	0	0	0	5	3	5	42	15	36	233	19	1.389	1.091	0	94	0	0	15	0	31	0	0	4	87	0	23	3.092
Aquático	0	0	10	625	314	125	0	340	0	292	0	4	0	1.183	1	86	318	0	45	0	234	412	0	131	123	0	0	4.242
Dutoviário	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (Transportes)	620	1.648	884	4.388	11.295	5.341	4.201	4.323	8.152	4.884	4.633	3.420	22.653	8.268	2.364	14.396	6.770	2.277	14.799	2.669	13.144	2.341	533	9.812	45.944	1.486	2.519	203.764
Rodoviário	223	604	313	1.286	4.041	1.864	1.228	1.455	3.544	1.650	1.869	1.329	8.522	2.084	917	5.910	2.355	847	5.419	955	4.785	712	192	3.615	20.906	556	916	78.095
<i>Individual motorizado</i>	105	338	111	485	1.750	1.051	873	697	1.734	667	786	605	4.088	838	547	2.807	1.144	436	3.125	501	2.626	315	90	1.939	11.990	306	280	40.234
<i>Coletivo</i>	10	97	12	92	481	203	130	168	229	94	93	106	867	176	86	461	277	70	641	84	446	50	12	226	2.027	74	51	7.260
<i>Distribuição</i>	13	34	11	51	205	116	84	106	204	63	88	114	547	85	49	420	134	45	291	52	358	47	12	250	1.393	28	35	4.839
<i>Transferência</i>	95	136	179	658	1.604	493	141	484	1.378	825	901	504	3.020	985	235	2.222	800	296	1.363	318	1.355	300	77	1.200	5.495	148	550	25.761
Aéreo	9	43	5	118	222	170	395	36	74	42	69	36	215	130	42	170	162	21	421	71	135	24	7	89	922	24	7	3.658
Ferroviário	0	0	0	0	9	1	4	13	5	11	73	6	438	341	0	30	4	0	46	0	13	0	0	1	140	0	7	1.143
Aquático	0	0	3	194	96	38	0	104	0	89	0	1	0	364	0	26	97	0	14	0	72	131	0	40	38	0	0	1.309
Dutoviário	0	0	0	9	15	0	30	0	1	0	0	0	8	0	0	6	0	0	15	0	5	0	0	5	54	0	0	148
Total (Transportes)	232	647	321	1.607	4.383	2.073	1.656	1.609	3.624	1.792	2.010	1.372	9.182	2.919	959	6.142	2.618	868	5.915	1.027	5.011	867	198	3.750	22.061	580	930	84.353
Energia (mil tep)																												
Energia per capita (tep/hab.)	0,3	0,2	0,4	0,4	0,3	0,2	0,6	0,4	0,5	0,3	0,6	0,5	0,4	0,4	0,2	0,6	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,3	0,6	0
Intensidade carbono (gCO₂e/MJ)	64	61	66	65	62	62	61	64	54	65	55	60	59	68	59	56	62	63	60	62	63	65	64	62	50	61	65	58
Carbono per capita (tCO₂e/hab.)	0,8	0,5	1,2	1,1	0,7	0,6	1,4	1,1	1,2	0,7	1,4	1,3	1,1	1,0	0,6	1,3	0,7	0,7	0,9	0,8	1,2	1,3	1,1	1,4	1,0	0,7	1,7	1,0
Carbono por PIB (gCO₂e/R\$)	34	27	48	38	34	30	15	27	35	46	32	31	33	47	31	28	32	43	17	35	26	48	39	29	18	29	65	25
Renováveis (%)	13%	17%	17%	12%	17%	16%	17%	13%	27%	12%	26%	19%	21%	10%	20%	24%	16%	15%	16%	15%	15%	13%	13%	15%	32%	17%	13%	22%
Fósseis (%)	87%	83%	83%	88%	83%	84%	83%	87%	73%	88%	74%	81%	79%	90%	80%	76%	84%	85%	84%	85%	85%	87%	87%	85%	68%	83%	87%	78%
Diesel (%)	48%	38%	49%	52%	49%	37%	20%	45%	47%	52%	54%	50%	50%	53%	36%	48%	43%	44%	36%	41%	41%	57%	48%	42%	38,04%	40,40%	65%	43%
Gasolina %	34%	37,2%	27%	22%	26%	36,3%	38%	32%	23%	28%	16%	27%	26%	22%	39%	24%	30%	38%	26%	36%	39%	27%	35%	39%	24%	38%	21%	28%

Fonte: autor.

Tabela B.2. Indicadores de MRV por entidade subnacional (ano 2010)

Dados desagregados		AC	AL	AP	AM	BA	CE	DF	ES	GO	MA	MT	MS	MG	PA	PB	PR	PE	PI	RJ	RN	RS	RO	RR	SC	SP	SE	TO	Total	
Geral	População (milhões)	0,7	3,1	0,7	3,5	14,0	8,4	2,6	3,5	6,0	6,6	3,0	2,4	19,6	7,6	3,8	10,4	8,8	3,1	16,0	3,2	10,7	1,6	0,5	6,2	41,3	2,1	1,4	191	
	PIB (bilhões)	15	50	15	112	284	146	265	157	196	85	104	87	645	152	62	414	179	41	827	66	443	44	12	283	2.379	49	30	7.141	
Emissões (Gg CO ₂ e)	Rodoviário	502	1.233	961	3.319	7.890	3.473	2.619	3.160	5.878	3.229	3.372	2.879	19.066	3.365	1.753	10.971	4.319	1.661	11.667	1.748	10.135	1.983	511	8.084	38.216	1.117	1.865	154.979	
	<i>Individual motorizado</i>	172	450	180	851	2.337	1.503	1.659	1.179	2.007	945	731	832	6.800	1.223	811	3.561	1.655	626	5.399	740	4.788	519	155	3.308	14.016	474	394	57.316	
	<i>Coletivo</i>	20	237	25	234	1.152	466	350	459	582	215	226	246	2.271	400	195	1.240	640	138	1.768	212	1.228	115	29	633	5.724	185	117	19.107	
	<i>Distribuição</i>	30	76	24	121	442	258	189	245	463	124	201	249	1.228	176	108	957	296	89	655	116	807	101	26	559	3.351	61	81	11.035	
	<i>Transferência</i>	279	470	732	2.113	3.960	1.246	421	1.277	2.826	1.945	2.214	1.552	8.768	1.567	639	5.213	1.729	808	3.845	680	3.312	1.248	301	3.584	15.125	398	1.273	67.521	
	Aéreo	38	101	10	414	718	425	913	135	166	130	165	114	486	335	66	482	526	46	1.130	241	391	82	38	185	2.357	59	21	9.773	
	Ferroviário	0	0	0	0	6	6	2	56	30	26	151	35	1.533	1.048	0	130	0	0	34	0	58	0	4	108	0	5	3.231		
	Aquático	0	1	11	804	359	18	0	239	144	449	0	0	0	1.222	1	79	12	0	67	0	442	288	0	100	226	3	0	4.464	
	Dutoviário	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total (Transportes)	539	1.335	982	4.537	8.974	3.921	3.534	3.590	6.218	3.834	3.688	3.028	21.085	5.970	1.820	11.662	4.857	1.707	12.897	1.989	11.027	2.354	549	8.374	40.906	1.179	1.890	172.446	
Energia (mil tep)	Rodoviário	184	485	336	1.200	3.063	1.347	1.062	1.181	2.564	1.188	1.398	1.109	7.279	1.237	687	4.640	1.726	607	4.672	677	3.841	722	182	3.081	18.284	427	681	63.861	
	<i>Individual motorizado</i>	75	223	76	373	1.214	692	742	522	1.274	429	522	427	3.197	518	374	2.171	839	263	2.580	341	2.060	231	64	1.491	10.224	212	192	31.324	
	<i>Coletivo</i>	7	80	8	79	388	157	118	155	196	72	76	83	765	135	66	418	216	46	596	71	414	39	10	213	1.928	62	39	6.437	
	<i>Distribuição</i>	10	25	8	40	147	86	63	82	154	41	67	83	408	58	36	318	98	30	218	39	268	34	9	186	1.113	20	27	3.666	
	<i>Transferência</i>	93	157	243	708	1.314	413	139	423	941	645	733	516	2.910	526	212	1.734	574	268	1.278	226	1.099	418	100	1.190	5.018	133	423	22.433	
	Aéreo	12	33	3	137	238	141	303	45	55	43	55	38	161	111	22	160	174	15	374	80	130	27	13	61	782	20	7	3.241	
	Ferroviário	0	0	0	0	2	2	3	17	9	8	46	11	472	321	0	40	3	0	44	0	21	0	0	1	130	0	1	1.132	
	Aquático	0	0	3	251	110	5	0	73	46	137	0	0	0	377	0	24	4	0	21	0	136	92	0	31	70	1	0	1.380	
	Dutoviário	0	0	0	5	10	0	19	0	1	0	0	0	5	0	0	4	0	0	10	0	3	0	0	3	35	0	0	95	
	Total (Transportes)	196	519	342	1.593	3.422	1.496	1.387	1.316	2.675	1.376	1.499	1.157	7.918	2.046	710	4.868	1.907	622	5.120	757	4.131	840	195	3.177	19.301	448	689	69.709	
Indicadores	Energia per capita (tep/hab.)	0,3	0,2	0,5	0,5	0,2	0,2	0,5	0,4	0,4	0,2	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,2	0,5	0,4	
	Intensidade carbono (gCO ₂ e/MJ)	66	61	68	68	63	63	61	65	56	67	59	62	64	70	61	57	61	66	60	63	64	67	67	63	51	63	65	59	
	Carbono per capita (tCO ₂ e/hab.)	0,7	0,4	1,5	1,3	0,6	0,5	1,4	1,0	1,0	0,6	1,2	1,2	1,1	0,8	0,5	1,1	0,6	0,5	0,8	0,6	1,0	1,5	1,2	1,3	1,0	0,6	1,4	0,9	
	Carbono por PIB (gCO ₂ e/R\$)	35	27	65	41	32	27	13	23	32	45	35	35	33	39	30	28	27	42	16	30	25	54	45	30	17	24	63	24	
	Renováveis (%)	11%	16%	15%	9%	15%	15%	16%	12%	25%	11%	21%	16%	14%	8%	17%	22%	17%	11%	15%	14%	13%	10%	9%	14%	31%	14%	12%	20%	
	Fósseis (%)	89%	84%	85%	91%	85%	85%	84%	88%	75%	89%	79%	84%	86%	92%	83%	78%	83%	89%	85%	86%	87%	90%	91%	86%	69%	86%	88%	80%	
	Diesel (%)	53%	48%	52%	58%	52%	42%	22%	49%	48%	53%	59%	57%	55%	53%	42%	49%	44%	53%	39%	42%	42%	42%	66%	58%	48%	40,22%	45,84%	68%	
	Gasolina %	28%	27,8%	17%	17%	22%	32,2%	38%	28%	24%	22%	15%	23%	27%	19%	37%	23%	28%	33%	21%	31%	37%	20%	26%	33%	23%	34%	19%	25%	

Fonte: autor.

Tabela B.3. Indicadores de MRV por entidade subnacional (ano 2005)

Dados desagregados		AC	AL	AP	AM	BA	CE	DF	ES	GO	MA	MT	MS	MG	PA	PB	PR	PE	PI	RJ	RN	RS	RO	RR	SC	SP	SE	TO	Total
Geral	População (milhões)	0,7	3,0	0,6	3,2	13,8	8,1	2,3	3,4	5,6	6,1	2,8	2,3	19,2	7,0	3,6	10,3	8,4	3,0	15,4	3,0	10,8	1,5	0,4	5,9	40,4	2,0	1,3	184
	PIB (bilhões)	10	36	10	78	204	95	175	108	124	58	79	55	434	93	40	294	116	25	622	46	314	29	7	188	1.714	33	18	5.006
Emissões (Gg CO ₂ e)	Rodoviário	491	1.059	680	2.272	5.877	2.265	2.270	2.138	4.162	1.945	3.013	2.503	15.061	2.623	1.271	10.280	3.135	1.106	10.076	1.284	8.566	1.691	215	6.835	33.495	829	1.239	126.381
	<i>Individual motorizado</i>	90	308	104	549	1.819	945	1.315	804	1.628	522	689	590	4.828	730	492	3.274	1.171	317	4.703	475	3.595	302	79	2.524	12.923	300	233	45.313
	<i>Coletivo</i>	16	175	19	178	829	348	341	381	454	160	170	191	1.759	276	137	1.018	440	110	1.533	173	1.160	81	18	572	4.918	146	78	15.678
	<i>Distribuição</i>	20	60	16	84	322	194	135	180	347	79	167	195	952	123	83	780	229	66	526	85	665	72	17	423	2.629	47	59	8.554
	<i>Transferência</i>	365	516	540	1.461	2.907	778	479	772	1.732	1.185	1.987	1.527	7.523	1.494	559	5.207	1.295	613	3.314	551	3.145	1.236	102	3.317	13.024	337	869	56.835
	Aéreo	27	60	8	362	537	276	647	69	82	63	80	74	296	256	19	338	424	29	1.089	167	321	62	18	133	2.351	23	17	7.827
	Ferroviário	0	0	0	0	10	5	2	62	29	30	70	30	1.397	887	2	116	1	0	28	0	61	0	0	5	87	0	0	2.822
	Aquático	0	2	10	604	296	8	0	197	104	282	0	0	0	926	1	65	95	0	252	2	358	209	0	54	172	2	0	3.638
	Dutoviário	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total (Transportes)	518	1.121	698	3.238	6.720	2.555	2.919	2.465	4.377	2.320	3.163	2.608	16.753	4.692	1.292	10.799	3.654	1.135	11.444	1.453	9.307	1.962	233	7.027	36.105	855	1.256	140.669
Energia (mil tep)	Rodoviário	168	388	228	795	2.114	851	917	801	1.597	684	1.078	905	5.567	922	480	3.950	1.185	396	3.800	478	3.240	579	78	2.561	13.575	306	428	48.073
	<i>Individual motorizado</i>	41	149	45	248	822	430	612	376	790	231	339	297	2.311	320	232	1.722	560	145	2.088	220	1.657	138	34	1.190	7.024	137	108	22.270
	<i>Coletivo</i>	5	56	6	57	267	112	110	123	146	52	55	61	566	89	44	328	142	35	493	56	373	26	6	184	1.583	47	25	5.046
	<i>Distribuição</i>	6	19	5	27	102	62	43	57	110	25	53	62	302	39	26	248	73	21	167	27	211	23	5	134	834	15	19	2.716
	<i>Transferência</i>	116	164	171	464	923	247	152	245	550	376	631	485	2.388	474	177	1.653	411	194	1.052	175	998	392	32	1.053	4.134	107	276	18.042
	Aéreo	9	20	3	120	178	92	214	23	27	21	27	25	98	85	6	112	140	9	361	56	107	21	6	44	780	8	6	2.596
	Ferroviário	0	0	0	0	3	2	2	18	9	9	20	9	410	259	1	34	2	0	32	0	20	0	0	1	95	0	0	926
	Aquático	0	0	3	189	91	2	0	60	33	86	0	0	0	285	0	20	29	0	77	1	110	66	0	17	53	1	0	1.124
	Dutoviário	0	0	0	13	24	0	46	0	1	0	0	0	12	0	0	9	0	0	24	0	8	0	0	8	85	0	0	231
	Total (Transportes)	178	408	234	1.117	2.409	947	1.180	902	1.667	800	1.125	939	6.087	1.552	487	4.126	1.357	406	4.294	534	3.485	666	84	2.631	14.589	314	434	52.951
Indicadores	Energia per capita (tep/hab.)	0,3	0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,5	0,3	0,3	0,1	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,3
	Intensidade carbono (gCO ₂ e/MJ)	70	66	71	69	67	64	59	65	63	69	67	66	66	72	63	63	64	67	64	65	64	70	67	64	59	65	69	63
	Carbono per capita (tCO ₂ e/hab.)	0,8	0,4	1,2	1,0	0,5	0,3	1,3	0,7	0,8	0,4	1,1	1,2	0,9	0,7	0,4	1,1	0,4	0,4	0,7	0,5	0,9	1,3	0,6	1,2	0,9	0,4	1,0	0,8
	Carbono por PIB (gCO ₂ e/R\$)	52	31	70	41	33	27	17	23	35	40	40	48	39	50	32	37	32	46	18	32	30	68	32	37	21	26	71	28
	Renováveis (%)	6%	11%	10%	7%	10%	12%	19%	12%	15%	7%	10%	11%	12%	5%	14%	15%	12%	10%	11%	11%	13%	6%	10%	13%	19%	12%	7%	14%
	Fósseis (%)	94%	89%	90%	93%	90%	88%	81%	88%	85%	93%	90%	89%	88%	95%	86%	85%	88%	90%	89%	89%	87%	94%	90%	87%	81%	88%	93%	86%
	Diesel (%)	72%	59%	54%	59%	54%	45%	26%	49%	51%	58%	67%	66%	60%	60%	51%	55%	46%	62%	40%	48%	46%	76%	52%	52%	45,21%	53,73%	74%	51%
	Gasolina %	16%	23,6%	14%	16%	24%	31,1%	35%	28%	30%	21%	19%	20%	24%	15%	32%	24%	27%	25%	23%	28%	32%	14%	30%	30%	27%	30%	17%	26%

Fonte: autor