

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE DA ASSOCIAÇÃO ENTRE O TEOR DE ENXOFRE NO
DIESEL E A SAÚDE RESPIRATÓRIA NO RIO GRANDE DO
SUL ENTRE 2012 E 2019**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LUIZA FICHTNER AYDOS

**PORTO ALEGRE
2024**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE DA ASSOCIAÇÃO ENTRE O TEOR DE ENXOFRE NO
DIESEL E A SAÚDE RESPIRATÓRIA NO RIO GRANDE DO
SUL ENTRE 2012 E 2019**

LUIZA FICHTNER AYDOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.

Orientador:
Prof. Pedro Rafael Bolognese Fernandes, D.Sc.

**PORTO ALEGRE
2024**

Aydos, Luiza F.

Análise da associação entre o teor de enxofre no diesel e a saúde respiratória no Rio Grande do Sul entre 2012 e 2019 / Luiza Fichtner Aydos. -- 2024.

82 f.

Orientador: Pedro Rafael Bolognese Fernandes, D.Sc.

Trabalho (Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

diesel, óxidos de enxofre, ANP, poluição atmosférica, internações hospitalares, problemas respiratórios, qualidade do ar I. Fernandes, Pedro Rafael B., orient.

Agradecimentos

Agradeço aos meus avós, Celeste, Nilo, Lucy e Claudio, por todo o amor do mundo e pelas alegrias e histórias de vida comigo compartilhadas.

Aos meus pais, Marília e Luiz, cujos exemplos de sabedoria e integridade são inestimáveis, agradeço por me ensinarem a valorizar e desejar o que ninguém pode nos subtrair: o conhecimento. Não menos importante, sou grata pela nossa união e amor incondicional.

Ao Gustavo, meu melhor amigo e companheiro, agradeço, principalmente, por cada gesto de carinho e incentivo. Assim como pelos aprendizados e conselhos preciosos, que foram fundamentais ao longo da minha trajetória acadêmica.

Ao Luan, cuja amizade foi essencial desde o início desta jornada e firmou-se para além dela, sou imensamente grata por podermos partilhar das nossas angústias e celebrar as nossas conquistas.

Agradeço à UFRGS e a todos os professores que fizeram parte desta história. Expresso um agradecimento especial ao Prof. Pedro Fernandes por inspirar este trabalho e por todo o apoio envolvido.

Resumo

Os últimos dois séculos foram marcados por diversos avanços nos campos tecnológico, industrial e agrícola, onde os combustíveis fósseis desempenham papel preponderante. Este desenvolvimento, ainda que bem sucedido, foi acompanhado pelo surgimento de alterações ambientais, em especial, atmosféricas. Os óxidos de enxofre (SO_x) são emitidos, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis e estão associados a problemas respiratórios em diferentes graus. A fim de mitigar os efeitos nocivos, normativas são constantemente atualizadas em nível internacional e nacional, onde, no Brasil, essas atualizações seguem em conformidade com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Em particular, o diesel é o derivado de petróleo mais consumido no Brasil e, conseqüentemente, acarreta em quantidade considerável de emissões de poluentes, inclusive SO_x . Este estudo investigou o impacto das alterações regulatórias do teor de enxofre no diesel na saúde respiratória da população do Rio Grande do Sul ao longo de oito anos (2012-2019). A análise considerou as vendas de diesel no setor rodoviário e a dinâmica entre os diferentes tipos de diesel comercializados (S10, S500 e S1800). Observou-se uma redução significativa de mais de 70% no conteúdo mássico total de enxofre mesmo com a manutenção do volume de vendas no mesmo período. Concomitantemente, houve uma redução nas taxas de internações por doenças respiratórias no SUS. Foram encontradas correlações fortes e significativas ($p < 0,05$) entre as internações e a quantidade estimada de enxofre no diesel, tanto em nível estadual quanto mesorregional. Os resultados sugerem a eficácia das medidas de redução do teor de enxofre no diesel, refletidas na significativa diminuição das taxas de internações hospitalares por doenças respiratórias.

Palavras-chave: diesel, óxidos de enxofre, ANP, poluição atmosférica, internações hospitalares, problemas respiratórios, qualidade do ar

Abstract

Over the past two centuries numerous advancements in technology, industry, and agriculture have been made, with fossil fuels playing a pivotal role. While these developments have been successful, they have also led to environmental changes, especially in the atmosphere. Sulfur oxides (SO_x), primarily produced by the combustion of fossil fuels, are linked to various degrees of respiratory issues. To mitigate the harmful effects, regulations are continually updated on both international and national levels. In Brazil, these updates are in line with the National Agency of Petroleum, Natural Gas, and Biofuels (ANP). Diesel, being the most consumed petroleum derivative in Brazil, results in a significant amount of pollutant emissions, including SO_x. This study examined the impact of regulatory changes in diesel's sulfur content on the respiratory health of the population in Rio Grande do Sul over an eight-year period (2012-2019). The analysis took into account diesel sales in the road transportation sector and the dynamics among different types of commercialized diesel (S10, S500, and S1800). Despite maintaining the sales volume, a significant reduction of over 70% in the total mass sulfur content was observed. A decrease in hospitalization rates for respiratory diseases has been observed in the Brazilian Unified Health System (SUS). Significant ($p < 0,05$) and strong correlations were found between hospitalizations and the estimated quantity of sulfur in diesel, both at the state and mesoregional levels. The results suggest that measures aiming the reduction of sulfur content in diesel are effective, as evidenced by the significant decrease in hospitalization rates for respiratory diseases.

keywords: diesel, sulfur oxides, ANP, atmospheric pollution, hospital admissions, respiratory problems, air quality

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xv
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Poluição atmosférica e a saúde humana	3
2.1.1 Transporte de poluentes e toxicologia no corpo humano	5
2.2 Poluentes atmosféricos	7
2.2.1 Material Particulado	8
2.2.2 Óxidos de enxofre	8
2.3 O diesel e as diretrizes para redução do seu teor de enxofre	10
2.3.1 Caracterização	10
2.3.2 Diretrizes e normativas	11
2.4 Consumo e distribuição de diesel	14
2.4.1 Vendas	15
3 Materiais e métodos	19
3.1 Fontes de dados	19
3.2 Fonte de dados auxiliares	22
3.3 Processamento dos dados e <i>softwares</i>	23
3.4 Determinação dos objetos de análise	24
3.4.1 Estimativa de quantidade de enxofre no diesel vendido	24
3.4.2 Quantificação de internações hospitalares no SUS por enfermida- des respiratórias	26
3.5 Análise da associação entre o teor de enxofre no diesel e internações por problemas respiratórios	26
3.5.1 Análise exploratória e correlacional	27
3.5.2 Padrões temporais e espaciais	27
4 Resultados e Discussão	29
4.1 Vendas de diesel e o conteúdo de enxofre	29
4.2 Quantificação de internações hospitalares no SUS por enfermidades res- piratórias	31

4.3	Associação entre interações e a massa de enxofre no diesel	33
4.3.1	Análise regional	35
4.3.2	Análise CIDs	37
4.4	Associação entre interações e a qualidade do ar	39
4.5	Limitações deste estudo	41
5	Conclusão	43
	Referências Bibliográficas	45
A	Qualidade do ar no RS	55
A.1	Estações de monitoramento FEPAM	55
A.2	Concentração atmosférica média de SO ₂ e PI ₁₀	56
B	Teor de biodiesel no diesel A	59
C	Estimativa de enxofre no diesel comercializado	61
D	Perfil anual de interações	63

Lista de Figuras

Figura 2.1	Evolução das vendas nacionais dos derivados de petróleo. Fonte: elaboração própria a partir dos dados do Anuário Estatístico (ANP, 2022; ANP, 2023a).	15
Figura 2.2	Vendas por tipo de diesel no RS (todos os segmentos). Fonte: elaboração própria a partir de dados de vendas de derivados de petróleo (ANP, 2023c).	16
Figura 4.1	Evolução das vendas de diesel (rodoviário) no RS e a sua massa de enxofre estimada no período de 2012 a 2021.	30
Figura 4.2	Evolução da frota de veículos pesados no estado do RS no período de 2012 a 2021.	31
Figura 4.3	Evolução da quantidade de internações respiratórias no SUS no período de 2012 a 2019 no RS.	32
Figura 4.4	Distribuição do perfil de internações respiratórias (SUS) nos meses ao longo do período de 2012 a 2019 no RS.	33
Figura 4.5	Análise da correlação entre a quantidade de internações por problemas respiratórios e a massa estimada de enxofre no diesel.	34
Figura 4.6	Análise de correlação por CIDs de relevância.	38
Figura 4.7	Análise de correlação por CIDs de relevância nas cidades de destaque.	39
Figura D.1	Perfil anual de internações respiratórias no SUS no RS.	64

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Quantidade vendida em milhares de m ³ de diesel rodoviário no RS. . .	16
Tabela 3.1	Metadados da base de dados de vendas de óleo diesel por tipo.	20
Tabela 3.2	Metadados do conjunto de dados de internações.	21
Tabela 3.3	Percentual de vendas por tipo de diesel no RS (todos os segmentos). . .	25
Tabela 4.1	Coefficiente de Pearson para as mesorregiões do RS.	35
Tabela 4.2	Varição anual percentual de internações em cidades de destaque e correlação forte.	36
Tabela 4.3	Varição anual percentual de internações em cidades de destaque e correlação fraca.	37
Tabela A.1	Descrição das Estações FEPAM.	55
Tabela A.2	Concentração média diária anual de SO ₂ (µg/m ³).	57
Tabela A.3	Concentração média diária anual de PI ₁₀ (µg/m ³).	58
Tabela B.1	Percentual de biodiesel no diesel por período.	59
Tabela C.1	Estimativa do teor mássico total de enxofre no diesel rodoviário comercializado no RS.	62

Lista de Símbolos

$\bar{\rho}_{\text{diesel},i}$	Massa específica média de diesel i	kg/m ³
$\bar{t}_{\text{biodiesel}}$	Teor médio de biodiesel adicionado ao diesel B	(v/v)%
i	Tipo de diesel, onde i é S10, S500 ou S1800	–
$m_{\text{diesel},i}$	Massa de diesel de acordo com o seu tipo i	kg
m_{enxofre}	Massa de enxofre total estimada	kg
$t_{\text{enxofre},i}$	Teor de enxofre conforme estabelecido pelas normativas ANP	ppm
V_{diesel_A}	Volume de diesel A	m ³
V_{diesel_B}	Volume de diesel B	m ³
$venda_i$	participação de mercado do diesel i	%
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Sulfato de amônio	
$(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$	Bissulfato de amônio	
CO	Monóxido de carbono	
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio	
H ₂ SO ₃	Ácido sulfuroso	
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico	
NO _x	Óxidos de nitrogênio	
O ₃	Ozônio	
ppb	Partes por bilhão	
ppm	Partes por milhão	
SO	Monóxido de enxofre	
SO ₂	Dióxido de enxofre	

SO ₃	Trióxido de enxofre
SO _x	Óxidos de enxofre

Siglas

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AQG	Diretrizes Globais de Qualidade do Ar
BNF	<i>Backus-Naur Form</i>
BP	Bases Primárias
BS	Bases Secundárias
CCS	Compostos Contendo Enxofre
CID	Classificação Internacional de Doenças e Problemas Relacionados à Saúde
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
DATASUS	Departamento de Informática do SUS
DPOC	Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IoT	<i>The Internet of Things</i>
IQAr	Índice de Qualidade do Ar
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Material Particulado
MS	Ministério da Saúde
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PMQC	Programa de Monitoramento da Qualidade dos Combustíveis
PPs	Poluentes Primários
Proconve	Programa de Controle de Emissões Veiculares

PRONAR	Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
PSs	Poluentes Secundários
RMPA	Região Metropolitana de Porto Alegre
RS	Rio Grande do Sul
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SIE Brasil	Sistema de Informações Energéticas
SIHSUS	Sistema de Internações Hospitalares do SUS
SP	Serviços Profissionais
SQL	<i>Structured Query Language</i>
SUS	Sistema Único de Saúde
UBTE	Ultra baixo Teor de Enxofre
UF	Unidade da Federação
ULSD	<i>Ultra-Low-Sulfur Diesel</i>

Capítulo 1

Introdução

Os combustíveis fósseis, em especial o diesel, desempenham um papel vital em setores da economia, como transporte, manufatura, geração de energia e agricultura. Os benefícios desses combustíveis se estendem desde a segurança até o bem-estar humano, impulsionando tecnologias que poupam trabalho e vidas, como sistemas de aquecimento, medicina e veículos. Além disso, contribuem para o aumento da produção e fornecimento de alimentos (Chevron Corporation, 2007; MICHAELIS, 1994). Apesar da relevância dos combustíveis fósseis, é fundamental considerar os desafios ambientais decorrentes de sua utilização. O setor de transporte é responsável por cerca de 64% do consumo global de petróleo, o que equivale aproximadamente a 27% de todas as formas de energia consumidas no mundo (AGARWAL; MUSTAFI, 2021).

Neste contexto, as emissões veiculares são um fator crítico para a qualidade do ar em áreas de grandes contingentes populacionais, representando um desafio para o ambiente e a saúde pública (YANG et al., 2019). As emissões provenientes de motores a diesel são uma fonte significativa de material particulado (MP) e de óxidos de enxofre (SO_x), onde os SO_x são poluentes corrosivos que contribuem para formação da chuva ácida e de *smog* (Chevron Corporation, 2007; YANG et al., 2019; ZHANG et al., 2023). A inalação desses compostos está associada a uma série de problemas de saúde, particularmente, em crianças e idosos. Doenças cardiovasculares e doenças respiratórias — como a doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) e infecções respiratórias — são algumas das afecções comumente associadas à exposição à poluição do ar (BOOTHE; BALDAUF, 2020; KO; HUI, 2012; World Health Organization, 2018). Além disso, essas emissões não só afetam a saúde humana, mas também aceleram a deterioração de infraestruturas, como estradas, pontes e edifícios, aumentando os custos de manutenção dessas (KARACA, 2013; KUMAR; IMAM, 2013; RAO et al., 2014).

Dada a relevância do diesel na matriz energética nacional, é crucial compreender as implicações e avaliar a eficácia das políticas ambientais até então adotadas. Este estudo concentrou-se nas alterações regulatórias do teor de enxofre no diesel ocorridas na última década no Brasil, cujo objetivo principal foi investigar os impactos dessas mudanças na saúde respiratória da população do estado do Rio Grande do Sul (RS). Embora outros combustíveis, como a gasolina, também apresentem enxofre em sua constituição, veículos com motores a diesel destacam-se em relação às emissões de SO_x . Assim, a partir de uma análise longitudinal, examinou-se a relação entre o histórico de vendas deste combustível no segmento rodoviário, seu teor de enxofre, e as internações hospitalares por doenças respiratórias registradas no Sistema Único de Saúde (SUS) do estado. Neste cenário, também se buscou explorar as informações da qualidade do ar gaúcho no que se refere a poluentes atmosféricos associados ao diesel. Dessa forma, este estudo se propôs a verificar a existência de correlação entre essas variáveis que apontassem a melhoria na qualidade da saúde dos gaúchos devido à redução do teor de enxofre no diesel. Logo, ele visa, sobretudo, contribuir para ampliar a compreensão da relação entre alterações dos combustíveis veiculares, a qualidade do ar e os impactos na saúde respiratória, especialmente considerando a escassez de estudos que acompanhem os efeitos das atualizações normativas incidentes sobre o setor de combustíveis no país.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

As emissões de poluentes a partir de atividades antropogênicas são responsáveis pela maior parte da poluição atmosférica, como as emissões veiculares provenientes da queima de combustíveis fósseis. Neste contexto, residentes de grandes áreas urbanas são consideravelmente expostos, e a gravidade do efeito observado é correlacionada ao tempo de exposição e aos tipos de poluentes presentes no ar (CIPOLLA et al., 2018; MANISALIDIS et al., 2020). Segundo a Organização das Nações Unidas (2019), mais da metade da população do mundo vive em áreas urbanas e espera-se que esta fração atinja cerca de 70% a partir de 2050. Poluentes atmosféricos são um grupo heterogêneo de substâncias que alteram a composição natural do ar, reduzindo a sua qualidade e causando impactos tanto no ambiente quanto na saúde humana (CIPOLLA et al., 2018; MANISALIDIS et al., 2020). A relação entre a poluição do ar e distúrbios pulmonares foi estabelecida na década de 1980, bem como a importância da qualidade do ar para a saúde. Assim, é reconhecido que a exposição de curto e de longo prazo ao ar de má qualidade causa aumento na morbidade e mortalidade excessiva sob diversos aspectos de saúde (BUTT et al., 2017; CHOWDHURY et al., 2020; POZZER et al., 2023).

2.1 Poluição atmosférica e a saúde humana

Atualmente, a associação entre a poluição do ar e o risco de doenças é muito investigada, porém, a quantificação desta relação é relativamente escassa devido à diversidade e complexidade da composição dos poluentes atmosféricos e à sinergia entre poluentes no corpo humano (ABDURRAHMAN et al., 2020; LU et al., 2021; POZZER et al., 2023; SPIRIC et al., 2012). Ademais, a poluição do ar varia espacial e temporalmente, dependendo das fontes e das condições de estabilidade atmosférica (AB-

DURRAHMAN et al., 2020). Para compreender como os poluentes se dispersam no ar, os modelos matemáticos geralmente consideram a concentração média desses poluentes no ambiente. Fatores como velocidade e trajetória do vento exercem influência significativa nessa distribuição. Outros fatores são a topografia regional, densidade de nuvens, pressão atmosférica e o fenômeno de inversão térmica. Por conseguinte, o monitoramento da poluição atmosférica torna-se também um desafio de saúde pública (MANISALIDIS et al., 2020; THURSTON, 2008).

Os indivíduos mais vulneráveis à poluição atmosférica são aqueles que permanecem por períodos prolongados próximo a vias movimentadas, como em paradas de ônibus, ou devido a atividades ocupacionais (ARBEX et al., 2012; LAUMBACH; KIPEN, 2012). Pessoas em situação socioeconômica desfavorável estão mais suscetíveis, pois tendem a enfrentar exposição prolongada a poluentes durante o deslocamento para o trabalho e, não raro, residem em áreas de tráfego ou próximas a zonas industriais, além de terem dietas com maior teor de gordura e menor quantidade de frutas e vegetais. Em um estudo realizado por Daniel et al. (2021), foi verificado que a exposição às emissões de tráfego, uma mistura de emissões gasosas e particuladas de diesel e de gasolina, prejudicou a capacidade imunológica e favoreceu a alteração da microbiota pulmonar para um perfil indesejado em camundongos, especialmente quando houve o consumo simultâneo de uma dieta rica em gordura. Já Saldiva et al. (1992) realizaram um estudo expondo ratos por seis meses a duas condições atmosféricas diferentes em São Paulo: o ar da cidade de São Paulo e o de Atibaia, considerado mais limpo à época. Observaram-se mudanças nas propriedades reológicas do muco respiratório, danos nos filamentos que revestem as vias aéreas e, conseqüentemente, um aumento da presença de bactérias no tecido respiratório dos ratos expostos ao ar da cidade de São Paulo. Durante o mesmo período, a taxa de mortalidade neste grupo foi cerca de 50%, enquanto que, para os ratos controle, foi de 10%. Por fim, estudos epidemiológicos apontam que há grupos naturalmente mais suscetíveis cuja saúde pode ser afetada mesmo em condições de baixa poluição do ar, como crianças e idosos (MANISALIDIS et al., 2020). As crianças são suscetíveis devido à sua maior taxa de ventilação e ao sistema imunológico em desenvolvimento. Já os idosos, pois enfrentam desafios relacionados à imunossenescência e à redução gradual da capacidade pulmonar. Adicionalmente, a exposição prolongada a poluentes está associada a desequilíbrios neurológicos nesse grupo, como demência. Por fim, portadores de do-

enças crônicas também demonstram maior vulnerabilidade aos efeitos dos poluentes atmosféricos (ARBEX et al., 2012; WU et al., 2015).

2.1.1 Transporte de poluentes e toxicologia no corpo humano

O trato respiratório é a via de entrada primária de poluentes no corpo, constituído de três zonas principais: (i) o trato respiratório superior, incluindo nariz e garganta, (ii) as vias aéreas dos brônquios superiores, por onde o ar é inspirado e (iii) a região alveolar, onde ocorre a troca de oxigênio entre os pulmões e a corrente sanguínea através de uma fina camada de células (THURSTON, 2008). Os poluentes têm propriedades físicas e químicas variadas, gerando efeitos tóxicos diversos. Em geral, os aerossóis são mais tóxicos do que os compostos gasosos devido à sua maior capacidade de penetração, enquanto que os compostos gasosos são mais prontamente expelidos pelo sistema respiratório (MANISALIDIS et al., 2020). A maneira como as partículas são inaladas, onde e em que quantidade são depositadas no trato respiratório dependem de diversos fatores, que incluem a quantidade inalada, defesas do sistema respiratório, e de características físico-químicas dos compostos; tamanho, forma, composição e solubilidade (no caso dos gases). A deposição de partículas é regida por mecanismos como sedimentação, impactação, difusão, interceptação e precipitação eletrostática, onde tais mecanismos são funções de propriedades do poluente. Ademais, as características biológicas do indivíduo que as inala também influenciam na deposição. Os principais determinantes são o volume de ar inalado, caracterizado pela taxa respiratória, e as dimensões do trato respiratório (MADL et al., 2018; SALDIVA et al., 1992).

O grau de penetração das partículas no trato respiratório varia de acordo com seu diâmetro e capacidade de reação com outros poluentes (CIPOLLA et al., 2018). Partículas maiores depositam-se preferencialmente nas vias aéreas superiores ou nas vias aéreas dos brônquios. Aquelas com diâmetro superior a $10\ \mu\text{m}$ são retidas pelo nariz e garganta, sendo expelidas por espirros ou engolidas. As partículas restantes, não exaladas, depositam-se no pulmão. Aquelas entre $10\ \mu\text{m}$ e $2,5\ \mu\text{m}$ frequentemente se acumulam nas vias aéreas superiores do pulmão, sendo as insolúveis prontamente eliminadas pelos cílios. Já as partículas menores que $2,5\ \mu\text{m}$ têm a difusão como mecanismo dominante e alcançam facilmente os pulmões, depositando-se e permanecendo na região alveolar por mais tempo, o que pode resultar em danos mais expressivos à saúde (SPIRIC et al., 2012; THURSTON, 2008). As partículas de tamanho reduzido

podem variar de finas (micrométricas) a nanopartículas. Modelos de deposição indicam que cerca de 90% das nanopartículas inaladas se depositam no trato respiratório, com cerca de metade delas atingindo os alvéolos. A aglomeração de partículas individuais pode modificar as suas características aerodinâmicas, resultando em um comportamento semelhante ao de partículas maiores, apesar de serem compostas por subcomponentes nanométricos. Em relação à eliminação dessas partículas do sistema respiratório, elas podem ser expelidas dos pulmões através de tosses ou espirros, transportadas para fora pelo muco nasofaríngeo, ou terem sua eliminação mediada por macrófagos. Além disso, podem ser processadas por mecanismos de quebra, dissolução ou lixiviação (MADL et al., 2018).

Os impactos à saúde podem ser agudos ou crônicos, variando desde irritação na pele e nos olhos até doenças neurológicas, cardiovasculares e respiratórias. Os agudos manifestam-se em um curto espaço de tempo após a exposição (horas ou dias), havendo uma forte correlação entre elevações dos níveis de poluentes e o aumento do número de consultas de emergência, internações hospitalares e óbitos. Os efeitos crônicos são decorrentes de exposições prolongadas e avaliados, geralmente, em estudos longitudinais com duração de anos ou décadas (ANNESI-MAESANO et al., 2021; ROSENFELD; FENG, 2011; SALDIVA et al., 1992). Particularmente, a exposição a níveis muito altos de poluição do ar pode causar lesões permanentes à saúde, como o desenvolvimento de doenças pulmonares como asma, bronquite, perda de capacidade pulmonar, enfisema, e, em especial, DPOC (ABDURRAHMAN et al., 2020). A DPOC é uma condição multifatorial caracterizada por obstrução crônica das vias aéreas, que é progressiva e associada a uma resposta inflamatória anormal do pulmão a partículas ou gases nocivos, não sendo completamente reversível uma vez iniciado o tratamento (BALA et al., 2021). Tratando-se do período anterior à vida adulta, foi comprovada a associação entre a poluição do ar e efeitos nocivos desde o início da vida humana, incluindo o período intrauterino e pós-natal. Estudos examinaram os efeitos da poluição do ar na gestação, revelando a suscetibilidade do feto à inalação dos poluentes pela mãe, uma vez que o transporte de oxigênio e glicose pela placenta é afetado. Os efeitos respiratórios precoces causados pela poluição do ar podem persistir na vida adulta e aumentar o risco de desenvolver doenças pulmonares (GOLDIZEN et al., 2016; MANISALIDIS et al., 2020). Por fim, a poluição atmosférica é considerada um fator de risco para doenças do trato respiratório tanto quanto à exposição à fumaça do tabaco. A ex-

posição a estas emissões podem agravar doenças pré-existentes, bem como aumentar o número de novos casos de doenças respiratórias (ARBEX et al., 2012).

Os mecanismos centrais nos efeitos cardiorrespiratórios são a inflamação e o estresse oxidativo resultantes da inalação de poluentes. A toxicologia dos poluentes revela uma relação complexa com o estresse oxidativo, um desequilíbrio entre antioxidantes e radicais livres no corpo. Esse desequilíbrio, junto com as respostas do sistema imunológico a danos ou estímulos externos, aumenta o risco de doenças respiratórias. Mais especificamente, a alta concentração de oxidantes e pró-oxidantes em poluentes como MP e óxidos gasosos, quando em contato com o revestimento pulmonar, desencadeia a produção de radicais livres de oxigênio e nitrogênio, provocando estresse oxidativo nas vias aéreas. O acúmulo de radicais livres, não neutralizados pelas defesas antioxidantes, leva a uma resposta inflamatória subclínica, impactando não só o sistema respiratório, mas também gerando efeitos sistêmicos (ANNESI-MAESANO et al., 2021; ARBEX et al., 2012; LAKEY et al., 2016).

2.2 Poluentes atmosféricos

A poluição atmosférica engloba poluentes gasosos e particulados, podendo ser biodegradáveis ou não, de origem natural ou antropogênica. Podem derivar de fontes únicas ou dispersas, fixas ou móveis, e são classificados como primários (PPs) ou secundários (PSs). Os PPs são emitidos diretamente no ar por fontes de poluição, como MP e poluentes gasosos. Suas principais fontes de emissão são usinas de energia e veículos com motores de combustão interna (MANISALIDIS et al., 2020). Os principais PPs apontados pelas agências ambientais são óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COVs), monóxido de carbono (CO) e dióxido de enxofre (SO_2) (ARBEX et al., 2012). Os PSs do ar são aqueles formados na atmosfera, principalmente a partir dos PPs, incluem o ozônio gasoso (O_3), formado a partir de NO_x e hidrocarbonetos, e aerossóis de sulfato e nitrato, que são particulados criados na atmosfera a partir de gases de SO_x e NO_x , respectivamente. Nas emissões antropogênicas, SO_2 e MP são oriundos do processo de queima de combustíveis fósseis. Os ácidos sulfuroso (H_2SO_3) e sulfúrico (H_2SO_4) são formados como resultado do processo de oxidação do SO_2 . Neste cenário, o agravamento dos sintomas respiratórios tem sido relacionado à exposição ao SO_2 (BALA et al., 2021; THURSTON, 2008).

2.2.1 Material Particulado

O MP consiste em matéria microscópica sólida ou líquida suspensa na atmosfera terrestre, podendo resultar de acidentes naturais, mas em sua maioria são de origem antrópica. O MP contempla partículas de composição e origem distintas, de diâmetro variável, mas muito pequenas, que penetram no sistema respiratório por inalação (MANISALIDIS et al., 2020). A composição química do MP atmosférico varia de acordo com suas principais fontes de emissão e com as reações químicas que ocorrem na atmosfera. A maioria do MP se forma na atmosfera como resultado de reações complexas de compostos químicos como SO_2 e NO_x . O MP inclui gases de escape de diesel, névoas ácidas, cinzas de carvão, poeiras minerais (carvão, amianto, calcário e cimento), poeiras e fumaças metálicas (zinco, cobre, ferro, chumbo), fluoretos, pigmentos de tinta, névoas de pesticidas e negro de fumo. As diretrizes internacionais e regulamentações nacionais de qualidade do ar concentram-se principalmente, em duas categorias, $\text{PM}_{2.5}$ e PM_{10} , que denotam, respectivamente, partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a $2,5 \mu\text{m}$ e $10 \mu\text{m}$. Em geral, processos de combustão são fontes comuns de emissão de $\text{PM}_{2.5}$ (BEHERA; PRASAD, 2020; SPIRIC et al., 2012).

2.2.2 Óxidos de enxofre

Os SO_x compreendem espécies químicas tais como monóxido de enxofre (SO), SO_2 e trióxido de enxofre (SO_3). Os SO_x também podem estar na forma particulada, neste caso consistem em sulfatos oriundos de compostos como, H_2SO_4 , bissulfato de amônio $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$ e sulfato de amônio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (CIPOLLA et al., 2018; SCHLESINGER, 2010). Portanto, além de PP, os SO_x são precursores da formação de MP (ROSENFELD; FENG, 2011). Outro fenômeno conhecido envolvendo essas espécies é a chuva ácida, na qual a oxidação adicional do SO_2 , geralmente na presença de um catalisador como o NO_2 , forma H_2SO_4 a partir da reação com o vapor d'água, e, assim, sob condições atmosféricas adequadas, há a precipitação sob a forma de chuva ácida (BEHERA; PRASAD, 2020; CHEN et al., 2007; SASSYKOVA et al., 2019). Os gases de enxofre são gerados sempre que compostos contendo enxofre (CCS) sofrem combustão, sendo os combustíveis fósseis a principal fonte antropogênica de tais poluentes, já que carvão e petróleo contêm enxofre. O SO_2 representa, aproximadamente, 95% do total de emissões de SO_x geradas pela queima desses combustíveis, logo, possui maior relevância toxicológica (ROSENFELD; FENG, 2011; SCHLESINGER, 2010).

O SO₂ é um gás incolor mais denso que o ar atmosférico e sua concentração no ar é normalmente inferior a 10 ppb (ROSENFELD; FENG, 2011; SCHLESINGER, 2010). Mais especificamente, o SO₂ é um irritante do trato respiratório, sua inalação tem ação corrosiva nas membranas mucosas. O SO₂ demonstrou causar, em especial, efeitos agudos na saúde respiratória, incluindo tosse e diminuição da função pulmonar (CHEN et al., 2007). A exposição ao SO₂ sob concentrações elevadas pode resultar em lesões significativas nas vias aéreas como edema pulmonar, edema laríngeo, espasmo das cordas vocais e asfixia. A concentração média de SO₂ no ar não deve exceder 500 µg/m³ durante um período de 10 minutos, tempo suficiente para a ocorrência de sintomas respiratórios graves (BEHERA; PRASAD, 2020; LU et al., 2021; ROSENFELD; FENG, 2011). Devido à sua alta solubilidade em água, o SO₂ pode ser prontamente absorvido pelas membranas mucosas do nariz e do trato respiratório, não atingindo, geralmente, as frações mais profundas do pulmão (CIPOLLA et al., 2018; ERICSSON; CAMNER, 1983). No entanto, quando partículas estão presentes junto ao SO₂, interações entre os poluentes podem alterar a toxicidade. Na presença delas, o SO₂ pode ser absorvido e reagir, convertendo-se em formas ácidas como H₂SO₄ ou (NH₄)HSO₄. Isso aumenta sua capacidade de penetração nos pulmões, gerando efeitos prejudiciais à saúde de médio e longo prazo. Além disso, uma vez que a adição de SO_x a uma partícula pode torná-la mais ácida, a solubilidade de metais é ampliada, fazendo com que estes estejam mais biodisponíveis à absorção pelo organismo. Tal fenômeno pode resultar em maior estresse oxidativo quando se trata de metais de transição, comparado à situação em que não há presença de SO_x na partícula (THURSTON, 2008).

Estudos sobre os efeitos de SO_x são conduzidos há décadas (FERRIS et al., 1979; RALL, 1974; WARE et al., 1981). Um dos primeiros episódios evidenciando a relação do SO₂ atmosférico e a saúde humana foi no ano de 1952 na cidade de Londres, Inglaterra, conhecido como *The Great Smog*. Na ocasião, este poluente atingiu níveis elevados que foram associados a um excesso de mortalidade na população local (London Administration, 2022; MANISALIDIS et al., 2020). Estudos mais recentes apontam a associação, em diferentes extensões, entre o teor de enxofre no ar e o efeito prejudicial à saúde respiratória (CHEN et al., 2007; DOMINGO; ROVIRA, 2020; GREENBERG et al., 2016; HENDRYX et al., 2019; ORELLANO et al., 2021; WANG et al., 2023). Estudos na Europa e no Irã revelaram associações significativas entre níveis de SO₂ e hospitalizações por DPOC em cidades como Viena, Turim, Colônia e Teerã (ANDERSON et

al., 1997; GHOZIKALI et al., 2016). Zhou et al. (2022) também estudaram o impacto do SO₂ no sistema respiratório ao avaliar a relação entre o SO₂ no ar atmosférico na cidade de Ganzhou, na China, e o número de casos de internações devido a problemas do sistema respiratório no período de 2017 a 2019. Os resultados indicaram que o aumento na concentração de SO₂ estava significativamente associado a um aumento das internações, em especial, em mulheres e pessoas acima de 65 anos.

2.3 O diesel e as diretrizes para redução do seu teor de enxofre

No petróleo bruto, os compostos contendo enxofre (CCS) são os componentes com heteroátomos geralmente mais abundantes (HAN et al., 2018), onde o teor mássico de enxofre varia de 0,1 a 6% (SHI; WU, 2021). Os CCS podem ser categorizados em seis tipos básicos, de acordo com seus grupos funcionais: as formas inorgânicas, sulfeto de hidrogênio (H₂S) e enxofre elementar (mais raramente encontrado), e as formas orgânicas, mercaptanas (tióis), sulfetos (cíclicos e acíclicos), polissulfetos e tiofenos. Tiofenos e sulfetos são, normalmente, os compostos predominantes no petróleo bruto (JUNIOR, 2023; SHI; WU, 2021). No contexto de derivados de petróleo, quanto menor o grau API, maior o teor de enxofre, ou seja, ele é diretamente proporcional ao ponto de ebulição (JUNIOR, 2023).

2.3.1 Caracterização

O diesel é um derivado do petróleo que é destilado em uma faixa de temperatura entre 150 °C e 380 °C e apresenta características adequadas para ser utilizado como combustível. É uma mistura complexa de diversos compostos cujo número de carbono varia de 10 a 22 (MATTOS, 2012). A energia específica do diesel é de cerca de 45,5 MJ/kg, enquanto que a da gasolina é de cerca de 45,8 MJ/kg. Ainda que a sua densidade energética seja levemente inferior, o diesel possui mais energia por volume: aproximadamente 36,9 MJ/L, contra 33,7 MJ/L da gasolina (European Automobile Manufacturers' Association, 2016). Em veículos pesados, o motor a diesel é preferido pela queima eficiente de combustível que resulta em um alto aproveitamento energético devido à elevada taxa de compressão da autoignição e ao bom desempenho, independentemente da carga transportada (IEA-AMF, 2013; WALLINGTON et al., 2022). Motores a diesel operam sob excesso de ar, logo, o perfil da emissão da combustão do

diesel difere daquele da gasolina, uma vez que contém não apenas componentes gasosos, mas também sólidos e líquidos (WADE; FARRAUTO, 2012). O enxofre presente no diesel é convertido no escapamento em sulfatos, o que pode contribuir para um aumento nas emissões de MP. Há uma forte correlação entre o enxofre do combustível e as emissões de MP, sendo os escapamentos de veículos a diesel a fonte de emissão mais significativa de MP no ar. Estima-se que as partículas do escapamento desse tipo de veículo correspondem a até 90% do MP no ar nas grandes cidades do mundo (JIANG et al., 2016). Considerando a relevância do enxofre para a segurança e a qualidade do ar, produtores de diesel vêm focando, há anos, na redução do teor desse elemento em sua composição. Atualmente, a produção ocorre em observância aos limites conforme as especificações e normativas em nível global, as quais variam conforme o país ou região, sendo que tais regulamentações vem progressivamente estabelecendo um baixo teor de enxofre no diesel. Neste contexto, o hidrotreatamento (HDT) é amplamente utilizado na indústria a fim de se reduzir os compostos sulfurados de diversas frações do petróleo (SHI; WU, 2021; Chevron Corporation, 2007). Em relação à conformidade técnica do diesel vendido no Brasil, o Programa de Monitoramento da Qualidade dos Combustíveis (PMQC) da ANP monitora, dentre outros, os teores de enxofre e de biodiesel exigidos por lei (ANP, 2020b).

2.3.2 Diretrizes e normativas

A Organização Mundial da Saúde (OMS) desempenha um papel importante na orientação das políticas ambientais globais por meio das suas Diretrizes Globais de Qualidade do Ar (AQG). Desde o seu estabelecimento, em 1958, essas diretrizes têm sido um referencial para a formulação de políticas ambientais visando a promoção da saúde pública (FOTOUREHCHI, 2016). Em setembro de 2021, a OMS atualizou este documento para estabelecer novas diretrizes para as concentrações anuais médias de poluentes. Embora não sejam legalmente vinculativas, a influência delas reverbera em escala global. No que se refere ao SO_2 , a OMS recomenda que sua concentração média não exceda $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ao longo de um período de 24 horas (VELASCO; JAROSINSKA, 2022; Organização Mundial da Saúde, 2021a; Organização Mundial da Saúde, 2021b).

As regulamentações para reduzir as emissões de poluentes a partir de veículos ao longo das últimas décadas resultaram em uma diminuição no teor de enxofre permitido no óleo diesel, atingindo níveis ultrabaixos. Como resultado desta redução, a

qualidade do ar em cidades ao redor do mundo, como nos Estados Unidos e na Europa, melhorou consideravelmente (STANISLAUS et al., 2010). Estas mudanças foram acompanhadas por tecnologias avançadas de pós-tratamento de emissões desenvolvidas para veículos com motores a gasolina e diesel visando o cumprimento das normativas. Isso resultou em reduções de emissões provenientes da frota rodoviária, a despeito do aumento de quilômetros (km) percorridos pelos veículos (LUBRIZOL, 2019; WALLINGTON et al., 2022). A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos estabeleceu padrões tanto para o teor de enxofre no diesel quanto para emissões provenientes de novos motores a diesel, especialmente para veículos rodoviários fabricados a partir do ano de 2007. Esses motores são projetados para funcionar exclusivamente com diesel de ultrabaixo teor de enxofre (UBTE) ou *ultra-low-sulfur diesel* (ULSD), que atualmente possui um teor de enxofre de 15 partes por milhão (ppm) ou menos. O uso de UBTE em conjunto com sistemas avançados de controle de emissões de escape pode resultar em reduções significativas, diminuindo as emissões de partículas a partir de veículos em até 90%. No entanto, mesmo com esses avanços, o consumo de diesel ainda continua contribuindo para a poluição do ar nos Estados Unidos, uma vez que a substituição dos veículos a diesel mais antigos por modelos mais novos e menos poluentes é um processo que demandará um tempo considerável (U.S. Energy Information Administration, 2022). Argumenta-se, da perspectiva de proteção ambiental, que um teor de 10 ppm de enxofre deva ser suficientemente baixo, não sendo necessário propor padrões mais rigorosos para o teor de enxofre (SHI; WU, 2021).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) foi criado pela Lei Federal n.º 6.938/1981 e é responsável pela adoção de medidas de natureza consultiva e deliberativa sobre o Sistema Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2018). O CONAMA também é responsável por regulamentar limites de emissão de poluentes do ar. Dentro das suas competências, o CONAMA emitiu várias resoluções, incluindo o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR) e o Programa de controle de emissões veiculares (Proconve). O Proconve foi criado a partir da CONAMA n.º 18/1986 como uma iniciativa que estabelece, por meio de várias etapas, exigências para os fabricantes de veículos para reduzir a emissão de poluentes no transporte rodoviário e impulsionar o avanço tecnológico na indústria automobilística. Com o Proconve, ficaram estabelecidas oito fases que definem critérios progressivos para a venda de veículos no mercado nacional, incluindo níveis máximos de emissão

de poluentes. Tais fases são análogas às medidas Euro de países europeus (Confederação Nacional de Transportes, 2020). Ademais, as fases são específicas para diferentes categorias de veículos, como veículos leves, pesados, máquinas rodoviárias e agrícolas. A fase P-8 iniciou-se no país em 1º de janeiro de 2022, com definição de aplicação das novas regras para fabricação de ônibus e caminhões a partir de 2023 (IBAMA, 2022).

Para o diesel disponível ao mercado brasileiro, é adotada a nomenclatura S (enxofre) seguida pelo número que indica o teor de enxofre em ppm, equivalente a miligramas por quilograma (mg/kg). As alterações deste teor são verificadas conforme as resoluções ANP reunidas na seção seis de cada edição do Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2020a). No Brasil, na década de 1980, foi permitido até 13.000 ppm de enxofre no óleo diesel. Já em 2009, o diesel comercializado no interior do Brasil passou a ser S1800 e o metropolitano, no máximo, S500. Em algumas regiões metropolitanas já existia a oferta de S50. Até o ano de 2013, foram comercializados no Brasil de forma predominante o diesel S500 e o S1800. A implementação da fase P-7 (CONAMA n.º 403/2008) a partir de 1º de janeiro de 2012, surtiu efeitos no que tange à redução significativa do teor de enxofre no diesel. A resolução ANP n.º 65/2011 estabeleceu que, a partir de 1º de janeiro de 2013, o óleo diesel S50 fosse substituído, integralmente, pelo óleo diesel S10. Além disso, ficou instituído que, em 2014, o diesel de uso rodoviário S1800 fosse totalmente substituído pelo S500. Dessa forma, o Brasil passou a usar apenas S10 e S500 no segmento rodoviário a partir de 2014. Por fim, a ANP n.º 50/2013 estabeleceu que existem dois tipos de óleo diesel rodoviário no país: S500 e S10. O uso do S10 é obrigatório em veículos de ciclo diesel fabricados a partir de 2012, todavia, como a frota de veículos comerciais no Brasil ainda é antiga, grande parte dos caminhões e ônibus ainda utilizam o S500. Em suma, o S50 e o S1800 deixaram de ser comercializados no Brasil em 2013 e 2014, respectivamente; sendo o S50 substituído pelo diesel S10 e o S1800, pelo S500.

Atualmente, conforme descrito pela Petrobrás (2024), o S10 é um UBTE desenvolvido para veículos leves e pesados fabricados a partir de 2012. Como características, possui um teor de enxofre de 10 ppm (máximo), número de cetano equivalente a 48 (mínimo) e massa específica entre 815 a 850 kg/m³ a 20 °C. Esse tipo de diesel é destinado a atender às tecnologias mais avançadas em sistemas de combustão e tratamento de emissões veiculares como parte das fases L7, P7 e P8 do Proconve. O Diesel S10 Petrobras é adequado para veículos equipados com tecnologias de pós-tratamento

para redução das emissões. Ele é compatível com sistemas de redução catalítica seletiva e recirculação de gases de escape, que são eficazes na redução significativa de MP e NO_x. Já o Diesel S500 é de baixo teor de enxofre (BTE) e foi desenvolvido para os veículos leves e pesados produzidos antes de 2012. As suas características são um teor de enxofre de 500 ppm (máximo), número de cetano 42 (mínimo) e massa específica entre 815 a 865 kg/m³ a 20 °C; também é adequado às tecnologias dos sistemas de combustão e de tratamento das emissões contidas nestes veículos, atendendo às fases L6, P5 e anteriores do Proconve. Ademais, atende aos requisitos da imensa maioria das máquinas para uso industrial, na geração de energia, uso agrícola e em locomotivas, entre outros. Adicionalmente, em 2023, a Petrobrás iniciou a produção e venda de diesel com conteúdo renovável (Diesel R), que é obtido pelo coprocessamento em unidades de HDT de matéria-prima de origem vegetal ou animal, em conjunto com diesel mineral. Segundo a Petrobrás (2024), o Diesel R apresenta as mesmas características físico-químicas do diesel S10, não exigindo qualquer alteração em veículos ou estruturas de armazenagem. No final de setembro de 2022, foi realizada a venda do primeiro lote contendo 5% de Diesel R (Diesel R5) para testes comerciais, com um volume de 1.500 m³ (UOL, 2022). Em abril de 2023, foram produzidos cerca de 6 milhões de litros de Diesel R5 e a expectativa é que, em 2027, atinja-se a produção de cerca 10,6 bilhões de litros por ano (CNN, 2023).

2.4 Consumo e distribuição de diesel

O diesel mineral, após ser refinado, é deslocado das refinarias aos consumidores finais por meio das distribuidoras, responsáveis pela etapa final da cadeia logística. Inicialmente, a primeira fase do transporte é realizada por dutos e navios, por vezes utilizando também modais rodoviário e ferroviário, para levar os produtos refinados às Bases Primárias (BP) das empresas distribuidoras. Nessas BP, geralmente equipadas com grandes tanques de armazenamento, o produto é estocado antes de ser transportado para as Bases Secundárias (BS) distribuídas pelo território nacional. Nesta fase, o transporte para as BS é feito, principalmente, por rodovias em rotas de baixo volume e curtas distâncias, enquanto o modal ferroviário é empregado em rotas de maior volume e extensão. Essa etapa finaliza com o transporte entre as BS e os postos revendedores, além de grandes clientes, como indústrias e instalações de geração de energia. É no início deste trajeto que geralmente ocorre a mistura do biodiesel

ao diesel mineral (A), formando o diesel B. A mistura do biodiesel é postergada até o último momento da distribuição devido às suas especificações químicas, o que torna a operação e transporte do combustível mais complexos. Normalmente, a mistura é feita no caminhão-tanque que leva o produto aos postos revendedores. Tal etapa é predominantemente conduzida por meio do modal rodoviário (CAETANO, 2013; Petrobrás, 2024).

2.4.1 Vendas

Segundo dados divulgados pela ANP nas edições do Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, o diesel tem sido, historicamente, o combustível mais consumido no mercado brasileiro (ANP, 2020a). Em 2022, a produção nacional total de derivados energéticos de petróleo foi de cerca de 108 milhões de m³, com o diesel correspondendo ao volume majoritário (ANP, 2022). A evolução das vendas nacionais dos principais derivados de petróleo, pelas distribuidoras, entre os anos de 2012 a 2022, é apresentada na Figura 2.1, onde GLP e QAV referem-se a Gás Liquefeito de Petróleo e Querosene de Aviação, respectivamente.

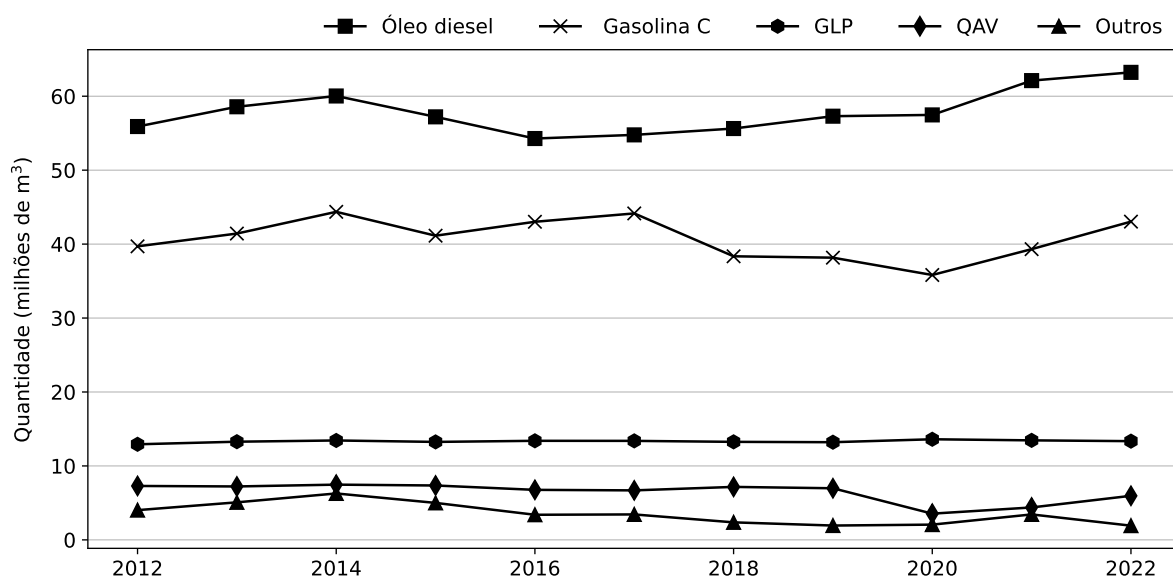


FIGURA 2.1. Evolução das vendas nacionais dos derivados de petróleo. Fonte: elaboração própria a partir dos dados do Anuário Estatístico (ANP, 2022; ANP, 2023a).

No contexto do RS, considerando o segmento rodoviário, foram vendidos quase 3 milhões de m³ de diesel entre 2012 a 2021, segundo o Ministério de Minas e Energia

(MME) e conforme apresentado na Tabela 2.1.

TABELA 2.1. Quantidade vendida em milhares de m³ de diesel rodoviário no RS.

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mil m ³	293,9	296,1	283,9	285,2	285,8	296,7	254,9	334,6	282,6	258,5

Elaborado pelo autor a partir dos dados do SIE Brasil (2023).

Destaca-se que a composição do diesel vendido não foi homogênea ao longo dos anos devido às regulamentações vigentes em cada período. Estas variações de composições devem-se às diversas normativas referentes ao teor de enxofre no diesel, bem como ao acréscimo progressivo de biodiesel a ele (ver Apêndice B). Neste cenário, as vendas de diesel se segmentam em duas categorias principais, Diesel S10 e S500, além do S1800 (1800 ppm), terminado em 2014. Portanto, à medida que houve mais predominância do S10 e S500 frente ao S1800, também houve aumento gradual do percentual volumétrico de biodiesel. A distribuição percentual das vendas totais por tipo de diesel ao longo de janeiro de 2013 a novembro de 2023 no estado do RS são apresentadas na Figura 2.2.

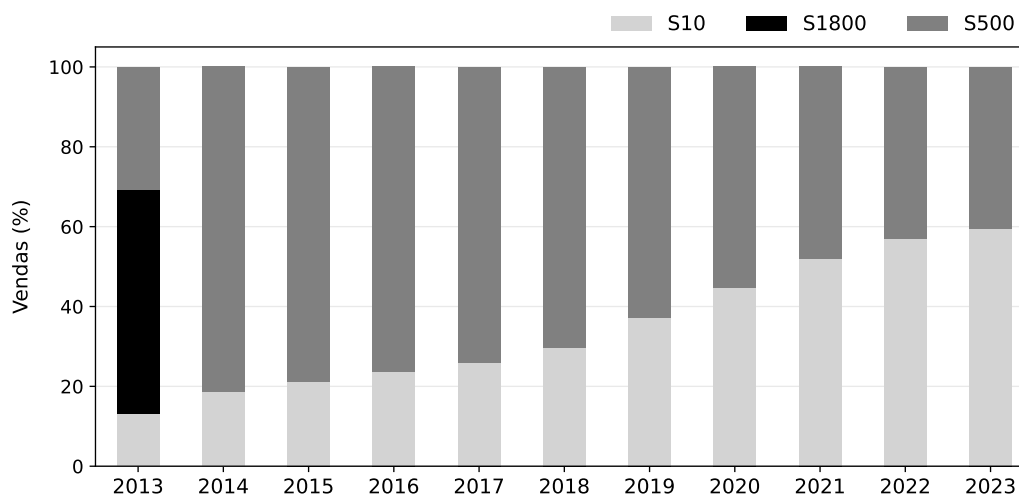


FIGURA 2.2. Vendas por tipo de diesel no RS (todos os segmentos). Fonte: elaboração própria a partir de dados de vendas de derivados de petróleo (ANP, 2023c).

No cenário brasileiro, o transporte rodoviário de cargas e passageiros desempenha um papel logístico essencial. Em contrapartida, o grande número de veículos

em circulação contribui com problemas relacionados ao tráfego, congestionamentos em horários de movimento e aumento na emissão de poluentes (SOLIANI; ARGOUD, 2018). Neste contexto, diversos fatores contribuem para a intensificação das emissões atmosféricas, destacando-se: condições meteorológicas, o tipo e a qualidade do combustível, condições de manutenção e condução, tecnologia do motor, projeto e materiais do sistema de alimentação de combustível, além do porte e idade do veículo (CORDEIRO et al., 2018). Um fator agravante nesse panorama é a idade média elevada da frota de caminhões no Brasil (Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística, 2018; Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2022). Assim, pela sua representatividade, o consumo de diesel merece destaque no que se refere à compreensão do volume de emissões, consumo e impacto na saúde da população.

Por fim, este capítulo salienta a influência direta da qualidade do ar na saúde respiratória, especialmente ao examinar o histórico das legislações sobre o teor de enxofre no diesel, a distribuição e venda deste combustível, centrando-se no RS. A redução progressiva desse teor ao longo do tempo realça a necessidade de estudos para validar as medidas adotadas, assim como para embasar e aprimorar as políticas e práticas voltadas para a redução dos efeitos adversos associados ao uso de combustíveis fósseis. Além disso, o RS carece de pesquisas que investiguem a qualidade do ar e seus impactos, oferecendo uma visão abrangente do aspecto ambiental, econômico e social no estado.

Capítulo 3

Materiais e métodos

Para avaliar os efeitos do teor enxofre no RS, este estudo investigou a relação entre as variações do teor de enxofre no diesel e a saúde respiratória de pacientes atendidos pelo SUS no RS ao longo de um período de oito anos. Para tanto, utilizaram-se duas fontes de dados primárias. A primeira, a ANP, integrante do Ministério de Minas e Energia (MME), forneceu informações relativas ao teor de enxofre no diesel; dados de vendas deste combustível; e a evolução percentual de biodiesel adicionado ao longo do período analisado. A segunda fonte, integrante do Ministério da Saúde (MS), foi o Departamento de Informática do SUS (DATASUS), que apresenta informações sobre internações hospitalares. Neste estudo, foram consideradas apenas aquelas relacionadas a doenças do aparelho respiratório restritas ao RS. Destaca-se que todas as fontes de dados consultadas neste trabalho são publicamente disponibilizadas sob o domínio gov.br.

3.1 Fontes de dados

ANP

A principal informação obtida por meio da ANP foi referente às vendas de diesel por tipo (teor de enxofre) deste combustível. Estes dados foram obtidos no formato de valores separados por vírgula ou *comma-separated values* (CSV) sob a seção de vendas de derivados de petróleo e biocombustíveis (ANP, 2023c) e referem-se a todos os segmentos de venda. A estrutura da base de dados é apresentada na Tabela 3.1.

TABELA 3.1. Metadados da base de dados de vendas de óleo diesel por tipo.

Nome do campo	Tipo	Descrição
ANO	char (4)	Ano no formato YYYY.
MÊS	char (2)	Mês no formato MM.
GRANDE REGIÃO	varchar (12)	Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sul e Sudeste.
UF	char (2)	Unidade da Federação.
PRODUTO	varchar (8)	Tipo de diesel: S-10, S-500, S-1800, Marítimo e Outros.
VENDAS	numeric	Volume (m ³) vendido de diesel.

DATASUS

A principal base de dados consultada desta fonte foi o Sistema de Internações Hospitalares do SUS (SIHSUS) (DATASUS, 2023c), que, em seus arquivos de Serviços Profissionais (SP), detalha o registro dos atendimentos de internações do SUS de forma individual e anonimizada. Esta fonte foi escolhida devido ao seu elevado grau de transparência e à possibilidade de identificação do município de residência do paciente. Além disso, o DATASUS contempla os atendimentos de saúde de parcela da população que potencialmente é mais vulnerável aos impactos da poluição atmosférica. Foram processados os arquivos de remessa da UF RS ao Governo Federal no período entre janeiro de 2012 e dezembro de 2020. A base de dados resultante do tratamento de dados possui 10.345.770 linhas e a sua estrutura é apresentada na Tabela 3.2. Os campos identificados com o prefixo *sp* são campos originais da base de dados fonte, enquanto que os demais foram obtidos a partir de fontes auxiliares, conforme descrito na próxima seção.

TABELA 3.2. Metadados do conjunto de dados de internações.

Nome do campo	Tipo	Descrição
sp_dtinter	char (6)	Data da internação no formato AAAAMM.
sp_cnes	char (7)	CNES do Estabelecimento de Saúde executante da AIH.
sp_naih	char (13)	Número da Autorização de Internação Hospitalar (AIH)
sp_cidpri	char (4)	Código do diagnóstico principal da internação (CID).
sp_m_pac	char (6)	Código IBGE do município de residência do paciente.
sp_m_hosp	char (6)	Código IBGE do município do CNES executante da AIH.
sp_procrea	char (8)	Código do procedimento principal realizado na AIH.
sp_atoprof	char (10)	Código do procedimento referente ao ato profissional (sp_procrea ou não).
cidade_pac	varchar	Município de residência do paciente.
mesorreg_pac	varchar	Mesorregião do município de residência do paciente.
cidade_hosp	varchar	Município do Estabelecimento de Saúde executor da AIH.
procrea_nome	varchar	Procedimento principal da AIH.
atoprof_nome	varchar	Procedimento referente ao ato profissional (sp_procrea ou não).
cid_nome	varchar	Nome da Classificação Internacional de Doenças e Problemas Relacionados à Saúde (CID).

3.2 Fonte de dados auxiliares

Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (FEPAM)

Visando a obtenção de parâmetros da qualidade do ar no RS, foram consultados os dados de monitoramento realizado pela FEPAM, que são divulgados anualmente por meio dos Relatórios de Qualidade do Ar (FEPAM, 2023), onde foram consultados os dados referentes aos período de 2012 a 2019. Os dados foram tabulados diretamente no Microsoft Excel, sendo considerados apenas aqueles referentes aos poluentes SO_2 e PI_{10} (partículas inaláveis, equivalentes a MP_{10}) para as estações de monitoramento automático: Canoas (PU), Esteio (VE), Triunfo (Polo), Triunfo (DEPREC), Gravataí (JT), Charqueadas (AT) e Guaíba (Parque 35). As estações escolhidas para o estudo foram aquelas que possuíam registros de SO_2 , priorizando as ativas a partir de 2012 ou, no mínimo, entre os anos de 2014 e 2019. A descrição das estações é apresentada na na Tabela A.1, já os valores referentes à concentração média dos poluentes no ar, nas Tabelas A.2 e A.3.

Sistema de Informações Energéticas (SIE Brasil)

O SIE Brasil (2023) fornece informações de oferta e demanda de energia no país. Esta fonte foi consultada para obter o volume (em unidades de mil m^3) de diesel vendido pelas distribuidoras no RS entre os anos de 2012 e 2021, sendo esta a última data disponível à época da elaboração deste trabalho. Esta fonte foi escolhida por apresentar a venda de diesel por segmento (agricultura, alimentos, ferroviário, rodoviário, entre outros). Assim, destaca-se que foi considerado exclusivamente o volume de venda pertencente ao segmento rodoviário. A consulta a esta ferramenta permite a tabulação e exportação das informações em arquivo Microsoft Excel.

ANP

A especificação do percentual de biodiesel no diesel, exigido por lei, foi obtida para cada ano do estudo conforme divulgado pela ANP (2023b) e diretamente tabulada em Excel. Tais percentuais são apresentados no Apêndice B.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)

A relação dos nomes dos municípios gaúchos e seus códigos de identificação foi obtida diretamente do IBGE, totalizando 497 códigos de municípios, além da classificação de suas respectivas mesorregiões (IBGE, 2023). Esta relação foi associada à base de dados de internações respiratórias. O IBGE também foi a fonte de informação da composição da frota veicular do RS no período do estudo (IBGE, 2022).

DATASUS

A partir do DATASUS, foram também obtidos dados auxiliares referentes aos atendimentos de saúde: a tabulação de CIDs (DATASUS, 2023a) e a tabela de códigos e nomes de procedimentos e serviços profissionais do SUS disponibilizada no Sistema de Gerenciamento da Tabela de Procedimentos, Medicamentos e OPM do SUS (DATASUS, 2023b).

3.3 Processamento dos dados e *softwares*

Expansão dos dados do DATASUS

Para possibilitar a manipulação dos dados provenientes do DATASUS, empregou-se a ferramenta TabWin versão 4.1.5 (DATASUS, 2023c). Desenvolvida e disponibilizada pelo próprio DATASUS, a ferramenta permite expansão de arquivos compactados, permitindo a tabulação dos dados, o processamento e a análise subsequentes.

Condicionamento dos dados

O *software* utilizado para o condicionamento e validação dos dados foi o QlikView, versão 12.80.20000.0, desenvolvido pela QlikTech Product em sua edição pessoal de 64 bits (2023). O QlikView foi utilizado para a conversão dos dados coletados do SUS para o formato CSV, bem como para realizar a associação das informações provenientes de arquivos auxiliares. O QlikView Script é uma linguagem de script proprietária semelhante ao SQL (*Structured Query Language*), onde sua sintaxe segue a notação *Backus-Naur Form* (BNF).

Análise e Cálculo do Teor Mássico de Enxofre no Diesel

A análise e cálculo do teor mássico de enxofre presente no diesel vendido foram realizados por meio do Microsoft Excel, versão 2310, da Microsoft Corporation (2023).

Análises Estatísticas e gráficas

As análises computacionais foram conduzidas no ambiente de notebook Jupyter, Python versão 3.10.12, disponibilizado pelo Google Colaboratory da Google LLC (2023). O código foi desenvolvido e executado nesse ambiente, fazendo uso das bibliotecas `math`, `matplotlib`, `numpy`, `pandas`, `seaborn` e `scipy`.

3.4 Determinação dos objetos de análise

3.4.1 Estimativa de quantidade de enxofre no diesel vendido

A determinação do conteúdo mássico de enxofre no diesel vendido consistiu em três etapas principais de cálculo, realizadas para cada ano entre 2012 e 2021:

- I. Dedução do percentual líquido de biodiesel adicionado ao diesel B, obtendo-se o volume de diesel A (diesel sem a adição de biodiesel). Utilizou-se a média ponderada desse percentual em um período de 12 meses, uma vez que ele foi variável na maioria dos anos do estudo (ver Apêndice B):

$$V_{\text{diesel}_A} [\text{m}^3] = V_{\text{diesel}_B} [\text{m}^3] \cdot (100 - \bar{t}_{\text{biodiesel}} [\%]) \quad (3.1)$$

- II. Análise e aplicação do percentual de venda por tipo i de diesel ao longo do período analisado (ver Tabela 3.3), obtendo-se o conteúdo mássico para cada tipo de diesel:

$$m_{\text{diesel},i} [\text{kg}] = V_{\text{diesel}_A} [\text{m}^3] \cdot \text{venda}_i [\%] \cdot \bar{\rho}_{\text{diesel},i} [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (3.2)$$

- III. Obtenção da massa total de enxofre, resultante do somatório da massa de enxofre para cada tipo de diesel vendido com base na sua especificação (S10, S500, S1800):

$$m_{\text{enxofre}} (\text{kg}) = \sum_i (m_{\text{diesel},i} [\text{kg}] \cdot t_{\text{enxofre},i} [\text{mg}/\text{kg}] \cdot 10^{-6} [\text{kg}/\text{mg}]) \quad (3.3)$$

onde, as variáveis utilizadas nas equações acima são definidas da seguinte maneira: V_{diesel_A} refere-se ao volume de diesel A (eliminação da fração de biodiesel presente); V_{diesel_B} refere-se ao volume de diesel B (com biodiesel) vendido pelas distribuidoras; $\bar{t}_{\text{biodiesel}}$ refere-se ao teor volumétrico percentual médio de biodiesel adicionado ao diesel B do ano; $m_{\text{diesel},i}$ refere-se à massa de diesel de acordo com o seu tipo i (S10, S500 ou S1800); venda_i refere-se ao percentual do volume vendido do tipo i em relação ao montante volumétrico da venda do ano; $\bar{\rho}_{\text{diesel},i}$ refere-se à massa específica média, conforme o intervalo de massas específicas informadas pela Petrobrás (2024) e ANP (2009) para cada tipo de diesel i ; $t_{\text{enxofre},i}$ refere-se ao teor de enxofre conforme estabelecido pelas normativas ANP (10 ppm, 500 ppm ou 1800 ppm); m_{enxofre} refere-se à massa de enxofre total calculada a partir das vendas de diesel no ano avaliado.

TABELA 3.3. Percentual de vendas por tipo de diesel no RS (todos os segmentos).

Ano	Diesel S10	Diesel S500	Diesel S1800
2013	13,21%	30,72%	56,07%
2014	18,58%	81,40%	0,02%
2015	21,20%	78,80%	0,00%
2016	23,58%	76,42%	0,00%
2017	26,04%	73,96%	0,00%
2018	29,65%	70,35%	0,00%
2019	37,21%	62,79%	0,00%
2020	44,63%	55,37%	0,00%
2021	51,90%	48,10%	0,00%

Elaborado pelo autor a partir dos dados apresentados na Tabela 3.1.

Os dados referentes às vendas por tipo de diesel estão disponíveis a partir do ano de 2013. Em virtude dessa limitação, a distribuição percentual das vendas para o ano de 2012 foi aproximada com base nos dados relativos a 2013 e, por conseguinte, a massa de enxofre considerada nesse ano foi equiparada àquela do ano de 2013. O volume vendido de diesel B foi apresentado na Subseção 2.4.1. O resumo do cálculo da massa de enxofre para cada ano, entre o período de 2013 a 2021, é apresentado no Apêndice C. Ressalta-se que para o estudo de correlação com internacionalizações, esta análise

foi restrita até o período de 2019, conforme descrito na próxima subseção. Adicionalmente, a evolução do percentual de biodiesel adicionado ao diesel é apresentada no Apêndice B.

3.4.2 Quantificação de internações hospitalares no SUS por enfermidades respiratórias

As internações hospitalares foram quantificadas no período de janeiro de 2012 a dezembro de 2019. A escolha da data de início foi fundamentada pela inserção do diesel S10 no mercado, inclusive substituindo o S50. O ano de 2019 foi escolhido como período limite da análise dado o cenário de 2020 marcado pela pandemia de COVID-19, contexto que afetou diretamente a ocorrência de atendimentos por problemas respiratórios na população (SAVIAN, 2021). A consulta foi realizada nos arquivos de remessa datados entre janeiro de 2012 e dezembro de 2020, onde 2020 foi considerado exclusivamente para capturar aquelas internações realizadas até dezembro de 2019, dada a possibilidade de retroatividade no processamento de informações no DATA-SUS. Assim, além da data de internação (campo `sp_dtinter`), a filtragem da base de dados foi realizada pelos campos de CID principal da internação e o município de residência do paciente, campos `sp_cidpri` e `sp_m_pac`, respectivamente. Mais especificamente, no que se refere ao local de residência, foram consideradas apenas as linhas cujo campo `sp_m_pac` correspondesse a um dos 497 códigos do IBGE dos municípios gaúchos, volume majoritário da base de dados do estudo dada a consideração dos arquivos remessa desta UF unicamente. Foram considerados apenas aqueles códigos CIDs pertencentes ao grupo *Doenças do aparelho respiratório*, Capítulo X, CIDs J00 a J99. Por fim, as internações foram quantificadas a partir da contagem distinta dos códigos de atendimentos anônimos individualizados (AIH), campo `sp_naih`.

3.5 Análise da associação entre o teor de enxofre no diesel e internações por problemas respiratórios

A análise teve como objetivo principal estabelecer a relação entre a massa de enxofre no diesel vendido e o número de internações devido a problemas respiratórios. Este estudo foi conduzido em nível estadual, considerando tanto o agregado anual de internações quanto os dados mensais, visando identificar padrões ou tendências ao longo do período investigado. Além disso, foram identificadas cidades com associa-

ções proeminentes ou com redução significativa no volume de internações por motivos respiratórios ao longo dos anos, conduzindo a uma análise mais detalhada.

3.5.1 Análise exploratória e correlacional

As análises correlacionais envolveram avaliar o grau de associação entre o volume de internações e indicadores de poluição atmosférica por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r), cujo valor é obtido a partir de:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.4)$$

onde, x_i e y_i representam os valores individuais dos conjuntos de dados (x_i, y_i) , e \bar{x} e \bar{y} denotam os valores médios de cada respectivo conjunto. A significância do coeficiente de correlação foi avaliada por meio de teste de hipótese, em que um p-valor inferior a 0,05 ($p < 0,05$) indica uma associação estatisticamente significativa. Foi realizada uma análise da distribuição da massa de enxofre no diesel ao longo do período estudado, conforme descrito na Subseção 3.4.1, com a posterior avaliação do grau de associação entre tal massa e a quantidade anual de internações por problemas respiratórios. Análises de correlação para investigar o impacto dos níveis dos poluentes SO_x e PM_{10} no ar, segundo a FEPAM, nas internações hospitalares também foram realizadas.

3.5.2 Padrões temporais e espaciais

A fim de se identificar padrões e tendências no contexto estadual de atendimentos de saúde, a quantificação mensal de internações foi realizada. Esta etapa incluiu a identificação de flutuações sazonais e possíveis meses com comportamentos atípicos ao longo do período do estudo. Objetivando-se verificar alterações no número de internações potencialmente relacionadas com as variações na massa de enxofre no diesel, foram exploradas correlações espaciais entre a quantidade de internações por problemas respiratórios em diferentes localidades e a massa de enxofre no diesel. Uma análise de *clusters* espaciais foi realizada para identificar áreas geográficas do estado com associações mais fortes entre os conjuntos de dados analisados, com posterior ampliação da análise para cidades com comportamento similar. Além disso, a análise foi estendida a CIDs de relevância, mais especificamente, aqueles associados a manifestações clínicas discutidas no Capítulo 2.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Este capítulo explora a interseção entre vendas de diesel, seu teor de enxofre, qualidade do ar e internações por doenças respiratórias no RS. Ressalta-se que todos os resultados aqui apresentados restringem-se a esta UF e que as regiões e cidades avaliadas referem-se ao local de residência do paciente, que pode ou não coincidir com o local de seu atendimento.

4.1 Vendas de diesel e o conteúdo de enxofre

A fim de compreender a evolução do consumo de diesel rodoviário e seu teor de enxofre após mudanças legislativas relevantes, investigou-se a relação entre as vendas de diesel rodoviário e a estimativa da quantidade mássica de enxofre presente, a qual foi obtida conforme a Subseção 3.4.1, valendo-se de informações sobre a venda deste combustível. A Figura 4.1 demonstra que a evolução da massa de enxofre não acompanha o volume vendido de diesel no período de 2014 a 2021 da forma como ocorria nos anos de 2012 e 2013. Isso mostra *a priori* que não há relação proporcional entre as variáveis apresentadas. Argumenta-se que esta observação é um resultado direto da alteração da legislação referente ao teor de enxofre, principalmente em decorrência da extinção do S1800 e crescente adoção de S10. Em particular, as vendas de diesel no segmento rodoviário oscilaram ao longo dos anos de 2012 a 2021, atingindo um pico em 2019 com 334,64 (mil m³) e um mínimo em 2018 com 254,86 (mil m³). Eventos como a greve dos caminhoneiros em 2018 (ocorrida de 21 a 31 de maio) (SANTOS, 2021) e o contexto atrelado à pandemia de COVID-19 nos anos de 2020 e 2021 são fatores que possivelmente impactaram no consumo de diesel. Além disso, a proporção de biodiesel no diesel aumentou progressivamente de 2012 a 2020, diminuindo ligeiramente

em 2021. A massa estimada de enxofre no diesel reduziu drasticamente ao longo do período, caindo de 275,84 toneladas em 2012 para 47,39 toneladas em 2021, sendo a maior taxa de decaimento observada entre 2013 e 2014.

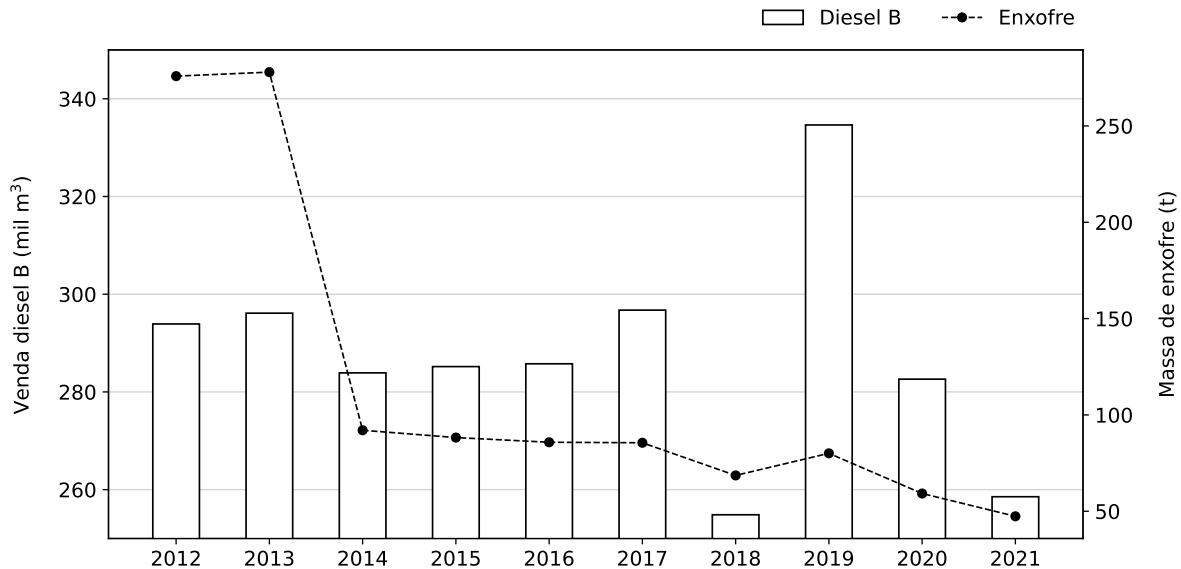


FIGURA 4.1. Evolução das vendas de diesel (rodoviário) no RS e a sua massa de enxofre estimada no período de 2012 a 2021.

Embora as vendas de diesel tenham mostrado uma variação percentual anual positiva nos anos de 2015, 2016 e 2017, foi verificada uma variação negativa da massa de enxofre nestes anos. Além disso, o ano de 2019 se destacou com o maior volume de vendas de diesel, porém, a massa de enxofre não seguiu a mesma proporção. Essa discrepância destaca a significativa redução no teor de enxofre, especialmente após 2013, com a saída do diesel S1800 e a maior adoção do diesel S10 desde então. Por fim, ressalta-se que o cenário observado no RS seguiu em conformidade com os dados observados em nível Brasil, que apontam a redução de emissões de SO_2 , tanto em volume absoluto quanto per capita (Community Emissions Data System (CEDS) – processado por Our World in Data, 2021). Tais observações apontam para a potencial melhora da qualidade do ar e saúde respiratória, justificando uma avaliação dos seus impactos, em vista dos efeitos discutidos no Capítulo 2. Além disso, a Figura 4.2 ilustra o perfil da frota de veículos pesados do RS entre 2012 e 2021, onde se verifica um aumento percentual de cerca de 24% considerando ambas as categorias (caminhões e ônibus). Segundo o IBGE, em 2012, haviam 34.943 ônibus e 198.113 caminhões, enquanto que

em 2021 foram registrados, respectivamente, 42.621 e 245.936. Paralelamente, a frota de automóveis aumentou em cerca de 36% no mesmo período, de 3.392.848 para 4.609.037 (IBGE, 2022). Logo, verifica-se que mesmo com um aumento de veículos, inclusive daqueles com motores a diesel, não houve aumento na massa de enxofre estimada no diesel consumido.

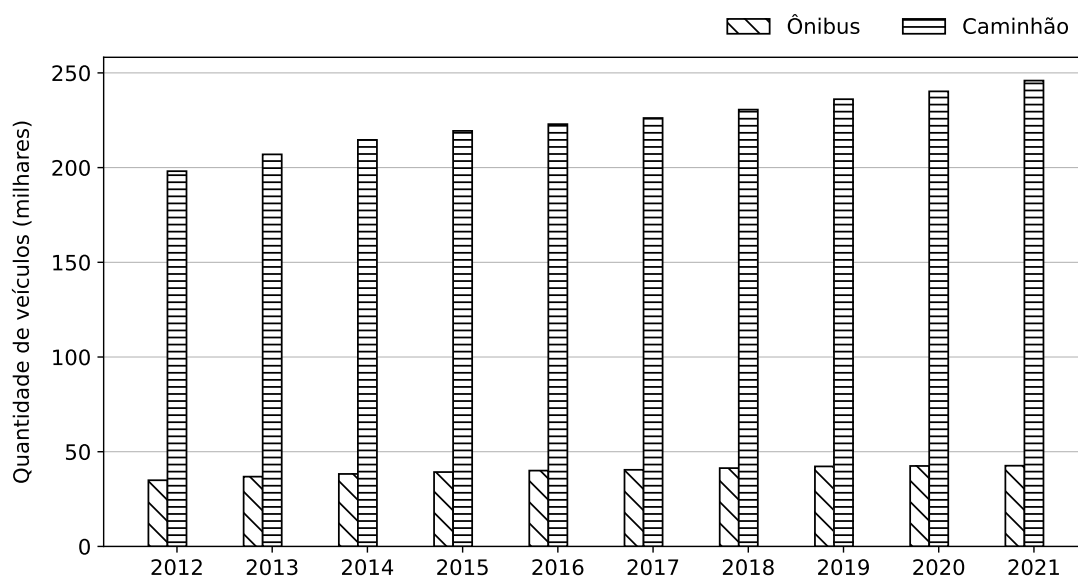


FIGURA 4.2. Evolução da frota de veículos pesados no estado do RS no período de 2012 a 2021.

4.2 Quantificação de internações hospitalares no SUS por enfermidades respiratórias

Dada a constatação da redução da massa de enxofre no diesel ao longo da última década, é pertinente avaliar se essa redução exerceu efeito na saúde respiratória da população. No que se refere às internações hospitalares, o período do estudo limitou-se até o ano de 2019 a fim de eliminar qualquer viés na análise das taxas de internações em decorrência de COVID-19 (SAVIAN, 2021). Realizou-se uma avaliação abrangente das internações por problemas respiratórios em todo o RS, considerando o agregado anual de casos. Os dados mostraram-se variáveis ao longo dos anos, conforme verificado na Figura 4.3, mas com uma tendência geral decrescente. Inicialmente, houve um aumento moderado das internações de 105.487 em 2012 para 109.930 em 2013. Con-

tudo, entre 2014 e 2019, à exceção de 2016, foi registrada uma diminuição progressiva nas internações, alcançando o menor número de 92.983 em 2019.

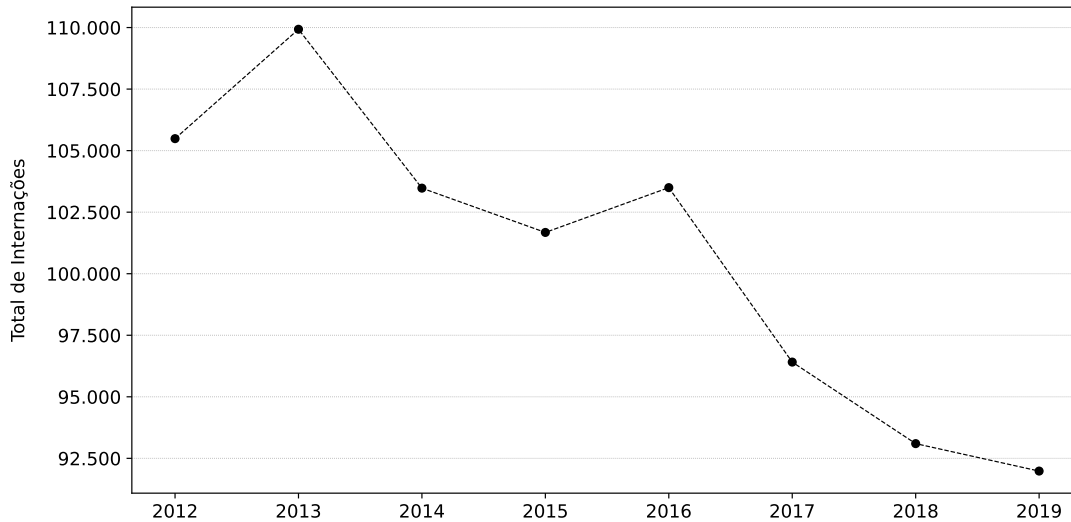


FIGURA 4.3. Evolução da quantidade de internações respiratórias no SUS no período de 2012 a 2019 no RS.

Este comportamento, caracterizado por flutuações, indica uma dinâmica multifatorial que pode estar sujeita a diversas influências. Para uma verificação mais detalhada, realizou-se uma análise do perfil anual de internações, utilizando a distribuição estatística da quantidade de casos ao longo dos oito anos. Essa investigação evidenciou padrões sazonais marcantes, com uma maior incidência de internações por problemas respiratórios nos meses mais frios, conforme pode ser verificado na Figura 4.4. Os meses entre maio e outubro destacaram-se com um número de internações acima da média mensal dos anos. O detalhamento do perfil de internações é apresentado de forma individualizada para cada ano no Apêndice D. Apesar da tendência geral de redução no período estudado, o perfil de distribuição das internações não aponta para uma única causa ou eventos excepcionais responsáveis pela diminuição global observada na Figura 4.3. Esses resultados sugerem que a dinâmica das internações não é impulsionada por eventos isolados, mas reflete uma tendência consistente ao longo do tempo. Neste contexto, destaca-se a presença de apenas duas ocorrências consideradas *outliers* nos meses de maio: um pico superior em 2016 e um mínimo em 2018. Em maio de 2016, foram registradas temperaturas abaixo da média histórica deste mês em decorrência de massas polares que atingiram a região centro-sul do país, fazendo com

que a capital gaúcha registrasse o mês de maio mais frio desde 1988 (CLIMATEMPO, 2016). Já em maio de 2018, ocorreu um mês mais seco que o normal em grande parte do Brasil, com temperaturas médias acima da média histórica em alguns locais da região Sul (METEREORED, 2018). Além disso, 2018 foi o segundo ano com a menor média mensal de internações, precedido apenas por 2019 (Apêndice D).

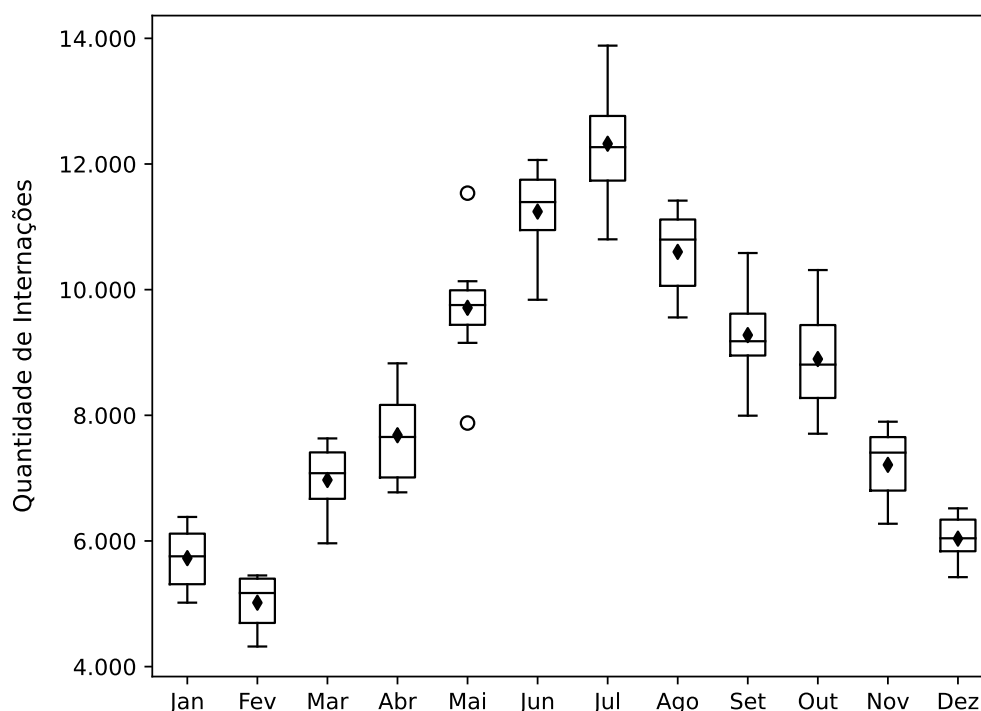


FIGURA 4.4. Distribuição do perfil de internações respiratórias (SUS) nos meses ao longo do período de 2012 a 2019 no RS.

4.3 Associação entre internações e a massa de enxofre no diesel

A análise da associação entre a massa de enxofre presente no diesel comercializado no segmento rodoviário e o total de internações no estado foi verificada a partir da obtenção do coeficiente de correlação de Pearson (Equação 3.4) e significância deste coeficiente foi avaliada por meio de um teste de hipótese, em que um p-valor inferior a 0,05 ($p < 0,05$) indica uma associação estatisticamente significativa. Em nível estadual, tal análise revelou uma relação forte e significativa, evidenciada pelo coeficiente

de Pearson igual a 0,73 ($p = 0,04$). Observa-se na Figura 4.5 que a redução da quantidade de enxofre presente no diesel esteve associada à uma diminuição no número de internações por problemas respiratórios, sugerindo um possível impacto positivo na saúde respiratória da população a partir da redução do teor de enxofre no diesel. A promoção da qualidade do ar atmosférico é um dos fatores motivadores por trás das alterações nas legislações relacionadas ao enxofre, dessa forma, os resultados sugerem a eficácia das medidas até então adotadas. Além disso, corroboram com estudos que investigaram a relação entre a poluição atmosférica e a saúde humana (KHANIABADI et al., 2017; MANTOVANI et al., 2016; ZHOU et al., 2022).

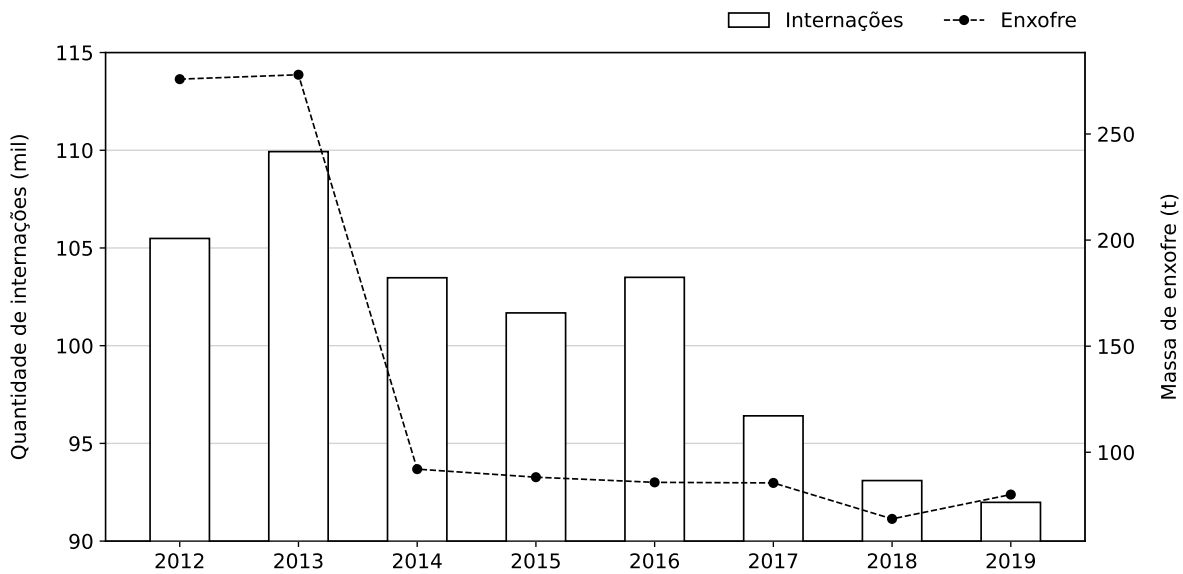


FIGURA 4.5. Análise da correlação entre a quantidade de internações por problemas respiratórios e a massa estimada de enxofre no diesel.

Do ponto de vista ambiental, o teor de enxofre presente no diesel S10 é considerado adequado (SHI; WU, 2021), especialmente diante da perspectiva de um maior teor de biodiesel adicionado ao diesel nos próximos anos (ANP, 2023b). No entanto, a adoção plena do consumo de diesel S10 ainda não foi alcançada. Em 2021, suas vendas no RS representavam cerca de 52% da participação de mercado do diesel rodoviário em comparação com 48% do S500. Já em 2023, até novembro, as vendas do S10 representaram cerca de 60% do total, indicando um avanço contínuo nesta adoção. Esses dados ilustram a evolução gradual desse tipo de combustível, evidenciando seu potencial para melhorar a saúde respiratória da população. O diesel desempenha um

papel fundamental nos transportes, sendo um componente vital para a manutenção e desenvolvimento econômico. Portanto, aprimorar sua qualidade e mitigar seu impacto ambiental é de grande importância. Contudo, fatores que podem prejudicar este cenário incluem: a idade da frota de veículos circulantes (Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2022), prejudicando a adoção de novos combustíveis de forma mais célere, além da falta de manutenção adequada dos veículos e de eventual aumento considerável no tamanho desta frota (PIRAS et al., 2019; SILVA et al., 2021).

4.3.1 Análise regional

Uma mesorregião consiste em uma forma de regionalização de áreas que compartilham características, sobretudo, geográficas, sociais e de articulação espacial. Esta forma de compartimentalização territorial atendeu ao propósito deste estudo ao permitir averiguar o perfil de internações respiratórias em diferentes zonas do RS nos anos de 2012 a 2019. Foram exploradas a correlação entre a quantidade de enxofre no diesel estimada conforme descrito na Subseção 3.4.1 e o total de internações hospitalares por mesorregião determinada pelo local de residência do paciente. Esta análise revelou as relações específicas entre esses fatores em diferentes áreas do estado. Conforme a Tabela 4.1, as mesorregiões Sudoeste Rio-grandense, Centro Ocidental Rio-grandense e Nordeste Rio-grandense se destacaram com os coeficientes de correlação mais elevados: 0,83 ($p = 0,01$), 0,76 ($p = 0,03$) e 0,76 ($p = 0,03$), respectivamente, indicando correlação forte e significativa entre a quantidade de enxofre no diesel e o número de internações por problemas respiratórios nessas áreas.

TABELA 4.1. Coeficiente de Pearson para as mesorregiões do RS.

Mesorregião	Coeficiente de Pearson
Sudoeste Rio-grandense	0,83
Centro Ocidental Rio-grandense	0,76
Nordeste Rio-grandense	0,76
Sudeste Rio-grandense	0,71
Metropolitana de Porto Alegre	0,71
Centro Oriental Rio-grandense	0,65
Noroeste Rio-grandense	0,28

As demais mesorregiões exibiram coeficientes de correlação moderados a fortes, à exceção do Noroeste Rio-grandense, que apresentou um coeficiente de correlação não significativo de 0,28 ($p = 0,51$), uma vez que a sua taxa de internações apresentou pouca variabilidade no período. Esta mesorregião é composta por 216 municípios e engloba microrregiões como Ijuí, Erechim, Passo Fundo, Santo Ângelo e Santa Rosa. Neste contexto, para uma compreensão mais abrangente dos impactos do teor de enxofre no diesel na saúde respiratória em diferentes regiões do estado, deve-se considerar as especificidades regionais, como atividades econômicas, variações na densidade populacional e infraestrutura de saúde.

A partir dos resultado expressos na Tabela 4.1, foram identificadas cidades que apresentaram coeficientes de correlação iguais ou superiores ao de sua mesorregião. Dentre elas, se destacaram Gravataí e Novo Hamburgo (Região Metropolitana de Porto Alegre - RMPA), e Santa Cruz do Sul (Centro Oriental Rio-grandense): além de apresentarem uma forte correlação, essas cidades demonstraram uma diminuição progressiva no número de internações nos últimos anos, conforme apresentado na Tabela 4.2, e possuem número considerável de habitantes frente a outras cidades gaúchas. Os coeficientes de Pearson para essas cidades foram, respectivamente, 0,90 ($p = 0,003$), 0,83 ($p = 0,01$) e 0,87 ($p = 0,005$).

TABELA 4.2. Variação anual percentual de internações em cidades de destaque e correlação forte.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Gravataí	-14,18%	-15,69%	-5,44%	12,63%	-2,80%	-5,10%	-2,34%
Novo Hamburgo	17,19%	-21,13%	-2,89%	-1,20%	-4,88%	-12,96%	-3,95%
Santa Cruz do Sul	6,32%	-18,37%	-12,60%	-6,42%	-4,63%	-10,18%	-13,31%

Por outro lado, cidades como Canoas, São Leopoldo, Pelotas e Uruguaiana apresentaram correlações fracas ou pouco moderadas entre a quantidade de enxofre no diesel e as internações respiratórias e, ainda assim, variações negativas no número de internações ao longo dos anos. Embora essas cidades não tenham mostrado uma correlação clara, as reduções nas taxas de internações indicam melhorias na saúde respiratória da população ao longo do tempo. Esta observação pode ser atribuída a mais de um fator, como, a outras influências ambientais ou ao fato de que as premissas deste

estudo não se aplicaram completamente à realidade dessas localidades. A Tabela 4.3 apresenta observações positivas do ponto de vista de saúde pública, uma vez que estas também são cidades com grande volume populacional e, historicamente, de internações, bem como são consideradas localidades de tráfego intenso.

TABELA 4.3. Variação anual percentual de internações em cidades de destaque e correlação fraca.

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Canoas	-5.15%	9.56%	-2.01%	-7.88%	-11.65%	-8.54%	-0.82%
Pelotas	6.98%	3.40%	18.93%	-16.87%	-10.97%	-8.52%	-9.98%
São Leopoldo	-11.37%	13.51%	-2.41%	-1.64%	-11.00%	-9.86%	3.91%
Uruguaiana	22.26%	-14.07%	-0.34%	-7.36%	-6.20%	-26.32%	3.41%

4.3.2 Análise CIDs

Foram investigados padrões de correlação entre a quantidade de enxofre no diesel e o volume de internações associadas a CIDs relacionados a condições respiratórias que são mais comumente suscetíveis à poluição atmosférica. Foram considerados, conforme discutido no Capítulo 2, os CIDs de asma, bronquite, pneumonia e DPOC. Na Figura 4.6 observa-se que os CIDs com maior volume de internações no período do estudo apresentaram, predominantemente, correlações positivas significativas, com coeficientes acima de 0,5. Em contrapartida, os CIDs com correlações negativas apresentam uma quantidade de internações aproximadamente cinco vezes menor do que os CIDs com correlações positivas. Ademais, a maioria das correlações negativas observadas são mais fracas do que as positivas. Os CIDs J15.8 - J44.9 apresentaram correlações positivas fortes e significativas ($p < 0,05$).

Por fim, esta análise foi estendida às três cidades de destaque, identificadas na Tabela 4.2. As correlações específicas para cada CID revelaram padrões distintos de associação entre a presença desse componente no diesel e as taxas de internação por essas condições de saúde, onde o CID relacionado à DPOC mostrou a maior consistência entre elas. O perfil das correlações nas três cidades, para cada CID, pode ser visualizado na Figura 4.7. Todos os CIDs da Figura 4.6 foram considerados, aqueles suprimidos não apresentaram ocorrência em internações com pacientes provenientes

das três cidades avaliadas.

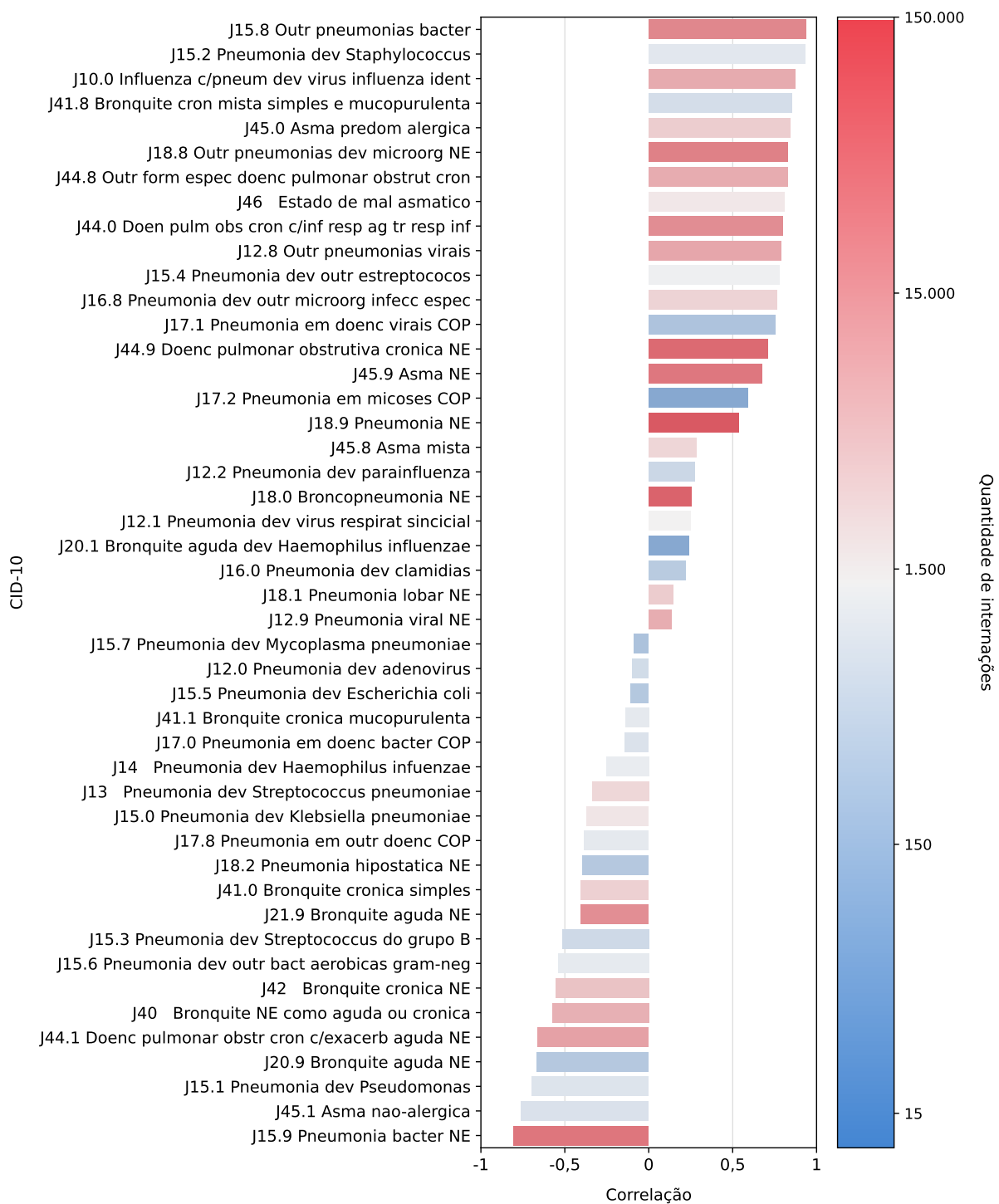


FIGURA 4.6. Análise de correlação por CIDs de relevância.

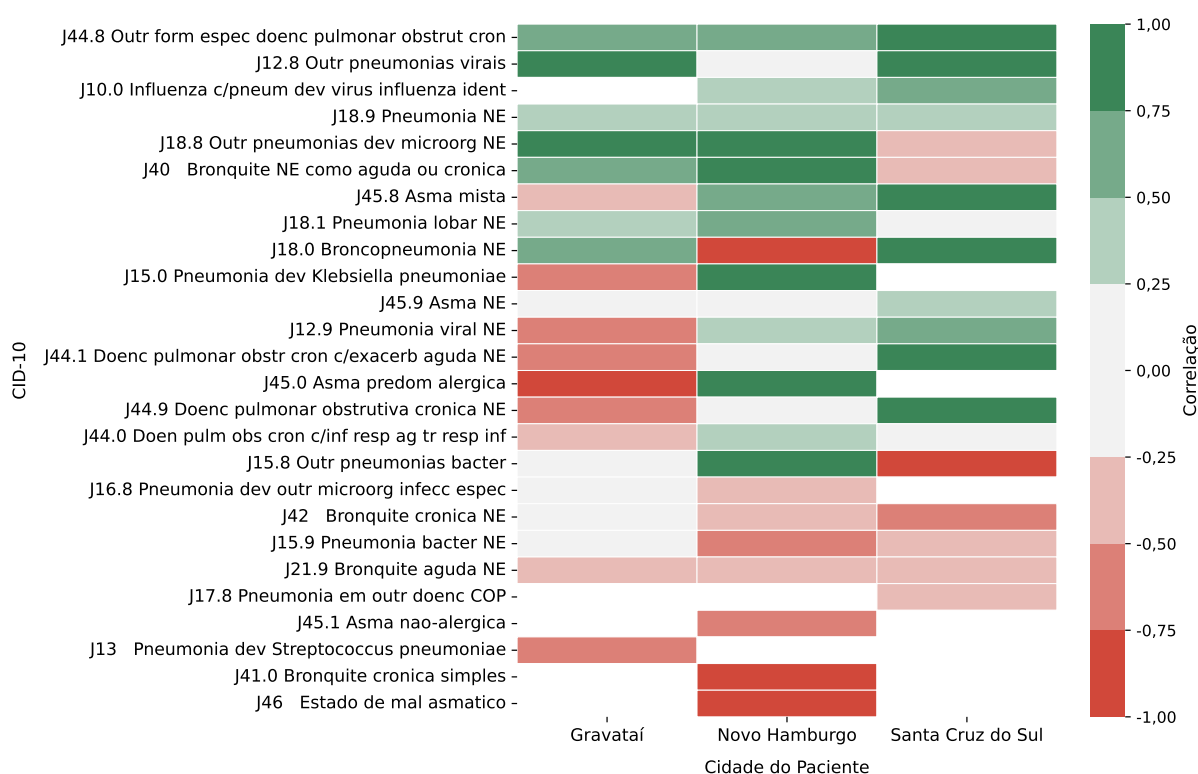


FIGURA 4.7. Análise de correlação por CIDs de relevância nas cidades de destaque.

4.4 Associação entre internações e a qualidade do ar

Buscou-se também analisar a correlação entre os níveis de poluentes do ar, especificamente SO_2 e PI_{10} , e o número de internações hospitalares por condições respiratórias em indivíduos de sete cidades com estações de monitoramento automático da FEPAM, descritas na Tabela A.1. As cidades de Esteio e Canoas apresentaram coeficiente de correlação de Pearson ligeiramente abaixo de 0,7 para SO_2 e PI_{10} , respectivamente. Os demais resultados vão de encontro à hipótese e às demais observações deste estudo, pois apontaram para correlações fracas e, quando forte, negativa. Ainda que o enxofre não seja a única fonte de poluição atmosférica, nem o único parâmetro de qualidade do ar, essa divergência pode ser atribuída, pelo menos em parte, à localização e ao contexto das estações de monitoramento da FEPAM; as quais predominantemente refletem influências industriais. As estações de monitoramento consultadas são majoritariamente influenciadas por atividades industriais, apresentando, em alguns casos, influência de tráfego veicular e influência urbana, em segundo plano. Por exemplo, as estações de Esteio e Canoas (VE e PU) são afetadas pela proximidade com a Refap, enquanto as estações Triunfo (Polo e DEPREC) estão vinculadas ao Polo Petroquímico

do Sul e à uma usina de energia. Assim, a proximidade dessas estações a zonas industriais e de produção energética pode distorcer a representação do contexto atmosférico das cidades adjacentes, o que influencia diretamente na aferição da qualidade do ar dessas regiões.

É importante destacar que foram identificadas limitações nos dados de monitoramento da FEPAM. Tais limitações incluem a falta de representatividade das medidas em diversos anos, conforme indicado pela própria Fundação, e a ausência de medidas em mais de um ano no período considerado, indicando a inexistência, inoperabilidade ou desativação da estação. Ressalta-se a impossibilidade de utilização dos dados da estação Triunfo (Polo) neste estudo por falta de dados representativos. Conforme o último relatório anual disponibilizado, em 2022, o percentual anual de dados válidos para SO₂ nesta estação foi de 33%, não sendo representativo neste período. Ademais, o portal de dados da FEPAM¹ esteve em estado de manutenção durante todo o período deste estudo, o que também limitou o acesso a possíveis informações complementares que poderiam enriquecer a investigação. Apesar dessas limitações, é importante mencionar que, conforme os relatórios anuais de qualidade do ar desta Fundação, as concentrações atmosféricas médias de SO₂ e PI₁₀ receberam a classificação “boa”. Já o Índice de Qualidade do Ar (IQAr) das estações operantes, o qual considera também outros poluentes, foi majoritariamente “bom”, seguido de “regular” e com escassos registros de “inadequado”. O IQAr “bom” ou “regular” atende aos padrões de qualidade do ar da resolução CONAMA nº 003/1990.

Por fim, sugere-se que a representatividade, precisão e extensibilidade das medições da qualidade do ar em relação às condições atmosféricas reais das cidades investigadas podem ser limitadas, o que influenciou diretamente a análise da correlação entre poluentes do ar e internações hospitalares por condições respiratórias. Logo, a existência de informações mais abrangentes sobre a qualidade atmosférica é importante, especialmente em regiões com alta densidade populacional, atividade industrial e tráfego de veículos.

¹<https://gis.fepam.rs.gov.br>

4.5 Limitações deste estudo

Neste estudo, algumas limitações e oportunidades de melhoria podem ser consideradas para uma compreensão e investigação mais profunda dos resultados apresentados. Estudos de caráter epidemiológico possuem complexidade inerente, especialmente tratando-se da avaliação do impacto dos poluentes atmosféricos na saúde humana. Primeiramente, a avaliação do efeito de cada poluente de forma individual pode superestimar os efeitos reais, pois suas influências normalmente se combinam, atuando de forma sinérgica e resultando em efeitos complexos na saúde humana. A interdependência entre diferentes poluentes atmosféricos faz com que seja um desafio, ainda hoje, isolar os impactos específicos de um único poluente, mesmo para estudos que empregam modelos multipoluentes (DAVALOS et al., 2017).

Além disso, variáveis extrínsecas, como as condições climáticas e fatores comportamentais, como o tabagismo, desempenham um papel substancial nos desfechos de saúde observados. No que diz respeito ao tabagismo, contrastando com a tendência nacional de redução, foi registrado um aumento de usuários de produtos derivados do tabaco no RS durante o período estudado. De acordo com o Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), a Pesquisa Nacional de Saúde (2019) indica que o percentual de pessoas maiores de 18 anos declaradas usuárias à época aumentou de 14,2% em 2013 para 15,8% em 2019, representando, respectivamente, 1.200.991 e 1.413.723 de pessoas. Ainda, conforme o Departamento de Economia e Estatística - Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do RS (2021), a população sofreu um acréscimo percentual de cerca de 3,3% no período compreendido entre 2012 a 2019. Logo, os fatos descritos acima, em conjunto com as observações de aumento da frota de veículos (Figura 4.2), sugerem que alterações realizadas quanto à composição e qualidade dos combustíveis são capazes de promover a qualidade do ar atmosférico e consequentemente a redução de danos à saúde.

Em relação aos insumos para os cálculos de correlação, as premissas adotadas na determinação do teor mássico de enxofre no diesel foram baseadas no volume de venda deste combustível considerando especificamente o segmento rodoviário. No entanto, essa variável é limitada à agregação anual por UF. Quando se trata do detalhamento por tipo de diesel, este se restringe ao volume de vendas de todos os segmentos no estado, sem a possibilidade de detalhamento individual. A limitação na disponibilidade de combinar informações mais granulares, especificamente, a venda

de diesel por município, por segmento ou tipo, também pode ter impactado a análise ao não permitir uma compreensão mais precisa das diferentes realidades regionais do estado. Quanto à quantificação das internações hospitalares, a análise se limitou às internações do SUS, excluindo registros ambulatoriais (aqueles em que não há pelo menos um pernoite). Este âmbito de atendimento é apresentado em outra base de dados do DATASUS, a qual possui um enorme número de linhas, refletindo a elevada taxa de registro deste tipo de atendimento. Este âmbito não foi considerado também pela impossibilidade de acesso e, conseqüentemente, quantificação de atendimentos individuais. Por fim, não foram contempladas as informações sobre a saúde privada, como planos de saúde e atendimentos particulares. Esta escolha se deu pelo fato das informações deste setor não apresentarem as mesmas características de transparência de informação. Adicionalmente, a parcela da população atendida pelo SUS apresenta maior suscetibilidade a impactos ambientais devido a características socioeconômicas, como local de residência, ocupação e padrões alimentares. Por fim, os dados mais recentes divulgados pelo DATASUS (2023c) indicam que o número de leitos disponíveis para atendimentos de saúde SUS no RS, considerando todas as especialidades de leitos, é cerca do dobro dos leitos não SUS.

Capítulo 5

Conclusão

Estudos sobre a incidência de doenças na população são fundamentais para compreender o impacto de longo prazo da poluição atmosférica. No entanto, ainda são enfrentados desafios na avaliação das emissões veiculares em condições reais, onde compreender os efeitos da poluição do ar na saúde humana requer uma abordagem integrada e multidisciplinar. A poluição atmosférica originada do tráfego rodoviário, uma das principais fontes de emissões móveis, está associada a problemas respiratórios, representados por um espectro de doenças. Os combustíveis derivados de petróleo, como o diesel, são essenciais em vários setores, incluindo transportes rodoviários, ferroviários e marítimos, e na geração de energia. Assim, o teor de enxofre no diesel tem sido objeto de mudanças regulatórias para reduzir os seus impactos na saúde e no ambiente.

A relação entre a alteração do teor de enxofre no diesel e seus efeitos na saúde respiratória da população do RS foi analisada longitudinalmente ao longo de oito anos, de 2012 a 2019. Esta investigação abrangeu não apenas as vendas de diesel no setor rodoviário, mas também considerou a dinâmica entre os diferentes tipos comercializados deste combustível — S10, S500 e S1800. A partir dos dados de venda de diesel no estado, o total do conteúdo mássico de enxofre foi estimado, evidenciando uma redução significativa: de 275,84 toneladas em 2012 para 47,39 toneladas em 2021. Neste período, não houve queda considerável no volume de vendas, indicando que a mudança de legislação seja de fato a principal causa desta observação. Ao passo que se constatou a redução progressiva do teor de enxofre no diesel, também se observou a redução nas taxas de internações por enfermidades respiratórias no SUS. Os vínculos entre as internações e a quantidade de enxofre presente no diesel foram explorados, onde a análise desdobrou-se em avaliações regionais e por CIDs. Foram encontradas

correlações fortes e significativas ($p < 0,05$) tanto em nível estadual quanto mesorregional. Em nível estadual, foi obtido um coeficiente de Pearson de 0,73, assim como foram obtidos coeficientes fortes para cinco das sete mesorregiões gaúchas. Conforme verificado na literatura, CIDs atrelados às formas de DPOC também apresentaram correlações relevantes, inclusive nas três cidades de destaque verificadas: Gravataí, Novo Hamburgo e Santa Cruz do Sul. Paralelamente, investigou-se a possível correlação entre essas internações e a qualidade do ar do estado monitorada pela FEPAM, onde se constatou a precariedade desses dados em relação à sua capacidade de representar o perfil atmosférico de cidades do RS.

Em conjunto, os resultados obtidos sugerem a eficácia das medidas de redução do teor de enxofre implementadas até o momento, em especial, quando considerado que a população, a frota de veículos e o número de fumantes no RS aumentaram no período avaliado. Esses resultados destacam a importância de alterações progressivas e paulatinas na legislação de combustíveis, atendendo tanto às questões ambientais, quanto socioeconômicas. No entanto, ainda são necessários mecanismos de monitoramento da qualidade do ar, bem como de acompanhamento dos impactos de tais alterações na população. São estratégias promissoras que requerem investimento e atenção contínua, o aprimoramento dos mecanismos de monitoramento existentes, assim como a implementação de sistemas, por exemplo, de inventário de emissões e de *The Internet of Things* (IoT) para detecção e monitoramento de emissões de fontes móveis. Além disso, devem ser realizadas novas pesquisas técnico-científicas direcionadas à mitigação mais eficiente das emissões dos motores veiculares.

Referências Bibliográficas

- ABDURRAHMAN, M. I.; CHAKI, S.; SAINI, G. Stubble burning: Effects on health & environment, regulations and management practices. *Environmental Advances*, v. 2, 2020. ISSN 26667657.
- AGARWAL, A. K.; MUSTAFI, N. N. *Real-world automotive emissions: Monitoring methodologies, and control measures*. 2021.
- Agência Nacional de Transportes Terrestres. *RNTRC em números*. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/cargas/rntrc-1/rntrc-em-numeros>>. Acesso em: 12/08/2023.
- ANDERSON, H. R.; SPIX, C.; MEDINA, S.; SCHOUTEN, J. P.; CASTELLSAGUE, J.; ROSSI, G.; ZMIROU, D.; TOULOUMI, G.; WOJTYNIAK, B.; PONKA, A.; BACHAROVA, L.; SCHWARTZ, J.; KATSOUYANNI, K. Air pollution and daily admissions for chronic obstructive pulmonary disease in 6 european cities: Results from the aphaea project. *European Respiratory Journal*, v. 10, 1997. ISSN 09031936.
- ANNESI-MAESANO, I.; FORASTIERE, F.; BALMES, J.; GARCIA, E.; HARKEMA, J.; HOLGATE, S.; KELLY, F.; KHREIS, H.; HOFFMANN, B.; MAESANO, C. N.; MCCONNELL, R.; PEDEN, D.; PINKERTON, K.; SCHIKOWSKI, T.; THURSTON, G.; WINKLE, L. S. V.; CARLSTEN, C. The clear and persistent impact of air pollution on chronic respiratory diseases: a call for interventions. *The European respiratory journal*, European Respiratory Society, v. 57, 3 2021. ISSN 1399-3003. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33737377>>.
- ANP. *Regulamento Técnico ANP N° X/ 2009*. 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/2009/arquivos-2009/cp-19-2009/minuta_resolucao.pdf>. Acesso em: 27/09/2023.
- ANP. *Anuários Estatísticos*. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico>>. Acesso em: 01/09/2023.
- ANP. *Programa de Monitoramento da Qualidade dos Combustíveis*. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2022>>. Acesso em: 01/09/2023.
- ANP. *Anuário Estatístico 2022*. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2022>>. Acesso em: 01/09/2023.

- ANP. *Anuário Estatístico 2023*. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2023>>. Acesso em: 2024-01-10.
- ANP. *Especificação do biodiesel*. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-bicombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>>. Acesso em: 11/11/2023.
- ANP. *Vendas de derivados de petróleo e biocombustíveis*. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/vendas-de-derivados-de-petroleo-e-bicombustiveis>>. Acesso em: 11/11/2023.
- ARBEX, M. A.; SANTOS, U. de P.; MARTINS, L. C.; SALDIVA, P. H. N.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L. F. A poluição do ar e o sistema respiratório. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, v. 38, 2012. ISSN 18063713.
- Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística. *Idade Média da Frota é de 12 anos*. 2018. Disponível em: <<https://www.portalntc.org.br/idade-media-da-frota-e-de-12-anos/>>. Acesso em: 12/08/2023.
- BALA, G. P.; RAJNOVEANU, R. M.; TUDORACHE, E.; MOTISAN, R.; OANCEA, C. Air pollution exposure—the (in)visible risk factor for respiratory diseases. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, 2021. ISSN 16147499.
- BEHERA, B. K.; PRASAD, R. Air pollution and controlling measures. *Environmental Technology and Sustainability*, Elsevier, p. 169–199, 1 2020.
- BOOTHE, V. L.; BALDAUF, R. W. Traffic emission impacts on child health and well-being. In: _____. [S.l.: s.n.], 2020.
- BUTT, E. W.; TURNOCK, S. T.; RIGBY, R.; REDDINGTON, C. L.; YOSHIOKA, M.; JOHNSON, J. S.; REGAYRE, L. A.; PRINGLE, K. J.; MANN, G. W.; SPRACKLEN, D. V. Global and regional trends in particulate air pollution and attributable health burden over the past 50 years. *Environmental Research Letters*, v. 12, 2017. ISSN 17489326.
- CAETANO, L. P. *Mapeamento e projeção do consumo de óleo diesel no Brasil*. 2013. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CHEN, T. M.; GOKHALE, J.; SHOFER, S.; KUSCHNER, W. G. Outdoor air pollution: Nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide health effects. *American Journal of the Medical Sciences*, v. 333, 2007. ISSN 00029629.
- Chevron Corporation. *Diesel Fuels Technical Review*. 2007. Disponível em: <<https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/diesel-fuel-tech-review.pdf>>. Acesso em: 02/08/2023.
- CHOWDHURY, S.; POZZER, A.; DEY, S.; KLINGMUELLER, K.; LELIEVELD, J. Changing risk factors that contribute to premature mortality from ambient air pollution between 2000 and 2015. *Environmental Research Letters*, v. 15, 2020. ISSN 17489326.

- CIPOLLA, M.; SORGENTI, M.; GENTILE, C.; BISHARA, M. M. Air pollution and lung diseases. In: _____. *Clinical Handbook of Air Pollution-Related Diseases*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 327–339. ISBN 978-3-319-62731-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62731-1_18>.
- CLIMATEMPO. *Por que maio de 2016 foi tão frio no centro-sul do BR?* 2016. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/por-que-maio-de-2016-foi-tao-frio-no-centro-sul-do-br,a3a99b3c4b386d4279adc5a035c727c7k8yb1kj0.html>>. Acesso em: 27/12/2023.
- CNN. *Petrobras avança em diesel renovável e produz 5,8 milhões de litros em abril*. 2023. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/petrobras-avanca-em-diesel-renovavel-e-produz-58-milhoes-de-litros-em-abril/>>. Acesso em: 08/10/2023.
- Community Emissions Data System (CEDS) – processado por Our World in Data. *SO₂ from diesel oil per capita*. 2021. Community Emissions Data System (CEDS) [original data]. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/explorers/air-pollution?time=2012..latest&facet=none&uniformYAxis=0&country=~BRA&Pollutant=Sulphur+dioxide+%28SO%E2%82%82%29&Fuel=Diesel&Per+capita=true>>. Acesso em: 27/12/2023.
- CONAMA. *Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA*. 2018. Disponível em: <<http://conama.mma.gov.br/o-que-e-o-conama>>. Acesso em: 23/08/2023.
- Confederação Nacional de Transportes. *Caderno CNT de perguntas e respostas sobre a fase P-8 do programa de controle da poluição do ar por veículos automotores - Proconve*. CNT, 2020. Disponível em: <<https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/0e8733db-0f86-47c2-856b-f296b1a8573f.pdf>>. Acesso em: 12/08/2023.
- CORDEIRO, M. C.; RODRIGUES, L. M.; MAIA, A. C.; MARUJO, L. Caminhos para a eficiência energética no transporte rodoviário de caminhões. In: . [S.l.: s.n.], 2018.
- DANIEL, S.; PUSADKAR, V.; MCDONALD, J.; MIRPURI, J.; AZAD, R. K.; GOVEN, A.; LUND, A. K. Traffic generated emissions alter the lung microbiota by promoting the expansion of proteobacteria in c57bl/6 mice placed on a high-fat diet. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 213, 2021. ISSN 10902414.
- DATASUS. *CID-10 Lista de Tabulação para Morbidade*. 2023. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/sih/mxqid10lm.htm>>. Acesso em: 15/06/2023.
- DATASUS. *Sistema de Gerenciamento da Tabela de Procedimentos, Medicamentos e OPME do SUS*. 2023. Disponível em: <<http://sigtap.datasus.gov.br/tabela-unificada/app/sec/procedimento/publicados/consultar>>. Acesso em: 25/07/2023.
- DATASUS. *Transferência de Arquivos*. 2023. Disponível em: <<https://datasus.saude.gov.br/transferencia-de-arquivos/>>. Acesso em: 20/07/2023.
- DAVALOS, A. D.; LUBEN, T. J.; HERRING, A. H.; SACKS, J. D. Current approaches used in epidemiologic studies to examine short-term multipollutant air pollution exposures. *Annals of Epidemiology*, v. 27, 2017. ISSN 18732585.

- Departamento de Economia e Estatística - Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do RS. *População*. 2021. Disponível em: <<https://dee.rs.gov.br/populacao/>>. Acesso em: 25/12/2023.
- DOMINGO, J. L.; ROVIRA, J. Effects of air pollutants on the transmission and severity of respiratory viral infections. *Environmental Research*, v. 187, 2020. ISSN 10960953.
- ERICSSON, G.; CAMNER, P. Health effects of sulfur oxides and particulate matter in ambient air. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, v. 9, 1983. ISSN 03553140.
- European Automobile Manufacturers' Association. *Differences between diesel and petrol explained*. 2016. Disponível em: <<https://www.acea.auto/fact/differences-between-diesel-and-petrol/>>. Acesso em: 23/08/2023.
- FEPAM. *Relatórios de Qualidade do Ar*. 2023. Disponível em: <<https://fepam.rs.gov.br/relatorios-de-qualidade-do-ar>>. Acesso em: 15/08/2023.
- FERRIS, B. G.; SPEIZER, F. E.; SPENGLER, J. D.; DOCKERY, D.; BISHOP, Y. M.; WOLFSON, M.; HUMBLE, C. Effects of sulfur oxides and respirable particles on human health. methodology and demography of populations in study. *American Review of Respiratory Disease*, v. 120, 1979. ISSN 00030805.
- FOTOUREHCHI, Z. Health effects of air pollution: An empirical analysis for developing countries. *Atmospheric Pollution Research*, v. 7, 2016. ISSN 13091042.
- GHOZIKALI, M. G.; HEIBATI, B.; NADDAFI, K.; KLOOG, I.; CONTI, G. O.; POLOSA, R.; FERRANTE, M. Evaluation of chronic obstructive pulmonary disease (copd) attributed to atmospheric o₃, no₂, and so₂ using air q model (2011-2012 year). *Environmental Research*, v. 144, 2016. ISSN 10960953.
- GOLDIZEN, F. C.; SLY, P. D.; KNIBBS, L. D. Respiratory effects of air pollution on children. *Pediatric pulmonology*, v. 51, 2016. ISSN 10990496.
- GREENBERG, N.; CAREL, R. S.; DERAZNE, E.; BIBI, H.; SHPRIZ, M.; TZUR, D.; PORTNOV, B. A. Different effects of long-term exposures to so₂ and no₂ air pollutants on asthma severity in young adults. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues*, v. 79, 2016. ISSN 10872620.
- HAN, Y.; ZHANG, Y.; XU, C.; HSU, C. S. Molecular characterization of sulfur-containing compounds in petroleum. *Fuel*, v. 221, 2018. ISSN 00162361.
- HENDRYX, M.; LUO, J.; CHOJENTA, C.; BYLES, J. E. Air pollution exposures from multiple point sources and risk of incident chronic obstructive pulmonary disease (copd) and asthma. *Environmental Research*, v. 179, 2019. ISSN 10960953.
- IBAMA, I. B. do Meio Ambiente e dos R. N. R. *Programa de controle de emissões veiculares (Proconve)*. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>>. Acesso em: 12/08/2023.

- IBGE. *Panorama Rio Grande do Sul. Veículos por tipo*. 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/panorama>>. Acesso em: 27/12/2023.
- IBGE. *Divisão Territorial Brasileira*. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/23701-divisao-territorial-brasileira.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 27/12/2023.
- IEA-AMF. *Diesel and gasoline*. 2013. Disponível em: <https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/diesel_gasoline>. Acesso em: 23/08/2023.
- JIANG, X. Q.; MEI, X. D.; FENG, D. Air pollution and chronic airway diseases: What should people know and do? *Journal of Thoracic Disease*, v. 8, 2016. ISSN 20776624.
- JUNIOR, A. W. Sequestrantes de compostos de enxofre para petróleo. *Revista Virtual de Química*, v. 15, n. 3, 2023.
- KARACA, F. Mapping the corrosion impact of air pollution on the historical peninsula of istanbul. *Journal of Cultural Heritage*, v. 14, 2013. ISSN 12962074.
- KHANIABADI, Y. O.; POLOSA, R.; CHUTURKOVA, R. Z.; DARYANOOSH, M.; GOU-DARZI, G.; BORGINI, A.; TITTARELLI, A.; BASIRI, H.; ARMIN, H.; NOURMORADI, H.; BABAEI, A. A.; NASERIAN, P. Human health risk assessment due to ambient pm10 and so2 by an air quality modeling technique. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 111, 2017. ISSN 09575820.
- KO, F. W.; HUI, D. S. Air pollution and chronic obstructive pulmonary disease. *Respirology*, Asian Pacific Society of Respirology, v. 17, p. 395–401, 2012.
- KUMAR, P.; IMAM, B. Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure. *Science of the Total Environment*, v. 444, 2013. ISSN 00489697.
- LAKEY, P. S.; BERKEMEIER, T.; TONG, H.; ARANGIO, A. M.; LUCAS, K.; PöSCHL, U.; SHIRAIWA, M. Chemical exposure-response relationship between air pollutants and reactive oxygen species in the human respiratory tract. *Scientific Reports*, v. 6, 2016. ISSN 20452322.
- LAUMBACH, R. J.; KIPEN, H. M. Respiratory health effects of air pollution: Update on biomass smoke and traffic pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, v. 129, 2012. ISSN 10976825.
- London Administration. *70 years since the great London smog*. 2022. Disponível em: <<https://www.london.gov.uk/programmes-strategies/environment-and-climate-change/environment-and-climate-change-publications/70-years-great-london-smog>>. Acesso em: 09/11/2023.
- LU, W.; TIAN, Q.; XU, R.; QIU, L.; FAN, Z.; WANG, S.; LIU, T.; LI, J.; LI, Y.; WANG, Y.; SHI, C.; LIU, Y.; ZHOU, Y. Ambient air pollution and hospitalization for chronic obstructive pulmonary disease: Benefits from three-year action plan. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 228, 2021. ISSN 10902414.

- LUBRIZOL. *How Sulfur Content in Diesel Fuel Impacts Engine Oil Formulation*. 2019. Disponível em: <<https://360.lubrizol.com/2019/How-Sulfur-Content-in-Diesel-Fuel-Impacts-Engine-Oil-Formulation>>. Acesso em: 23/08/2023.
- MADL, A. K.; SUN, X.; SILVA, R. M.; KADIR, T.; PINKERTON, K. E. Particle toxicities. *Comprehensive Toxicology: Third Edition*, Elsevier, v. 15-15, p. 263–301, 1 2018.
- MANISALIDIS, I.; STAVROPOULOU, E.; STAVROPOULOS, A.; BEZIRTZOGLU, E. Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, v. 8, 2020. ISSN 22962565.
- MANTOVANI, K.; NASCIMENTO, L.; MOREIRA, D.; VIEIRA, L.; VARGAS, N. Air pollutants and hospital admissions due to cardiovascular diseases in são José do rio preto, brazil. *Ciencia e Saude Coletiva*, v. 21, 2016. ISSN 16784561.
- MATTOS, C. V. L. de. *Estudo da correlação das propriedades do diesel, biodiesel e suas blends com a lubrificação*. 2012. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- METEREORED. *Maio 2018: o que ocorreu no Brasil e no mundo?* 2018. Disponível em: <<https://www.tempo.com/noticias/actualidade/maio-2018-o-que-ocorreu-no-brasil-e-no-mundo-.html>>. Acesso em: 27/12/2023.
- MICHAELIS, A. R. Isr: 100 years of the diesel engine economic and social impact. *Interdisciplinary Science Reviews*, v. 19, 1994. ISSN 17432790.
- ORELLANO, P.; REYNOSO, J.; QUARANTA, N. Short-term exposure to sulphur dioxide (so2) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, v. 150, 2021. ISSN 0160-4120.
- Organização das Nações Unidas. *ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050*. 2019. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>>. Acesso em: 08/09/2023.
- Organização Mundial da Saúde. *What are the WHO Air quality guidelines?* 2021. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>>. Acesso em: 08/09/2023.
- Organização Mundial da Saúde. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization, 2021. ISBN 9789240034228. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>>. Acesso em: 08/09/2023.
- Pesquisa Nacional de Saúde. *Tabela 4162 - Pessoas de 18 anos ou mais de idade usuários atuais de produtos derivados do tabaco, por sexo e situação do domicílio*. 2019. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/4162#notas-tabela>>. Acesso em: 25/12/2023.
- Petrobrás. *Óleo diesel: o combustível que movimenta o país*. 2024. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/quem-somos/oleo-diesel>>. Acesso em: 27/09/2023.

- PIRAS, G.; PINI, F.; GARCIA, D. A. Correlations of pm10 concentrations in urban areas with vehicle fleet development, rain precipitation and diesel fuel sales. *Atmospheric Pollution Research*, v. 10, 2019. ISSN 13091042.
- POZZER, A.; ANENBERG, S. C.; DEY, S.; HAINES, A.; LELIEVELD, J.; CHOWDHURY, S. Mortality attributable to ambient air pollution: A review of global estimates. *GeoHealth*, v. 7, 2023. ISSN 24711403.
- RALL, D. P. Review of the health effects of sulfur oxides. *Environmental Health Perspectives*, Vol 8, 1974. ISSN 00916765.
- RAO, N. V.; RAJASEKHAR, M.; RAO, G. C. Detrimental effect of air pollution, corrosion on building materials and historical structures. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, v. 03, 2014. ISSN 2320-0936.
- ROSENFELD, P. E.; FENG, L. G. The paper and pulp industry. *Risks of Hazardous Wastes*, William Andrew Publishing, p. 103–113, 1 2011.
- SALDIVA, P. H.; KING, M.; DELMONTE, V. L.; MACCHIONE, M.; PARADA, M. A.; DALIBERTO, M. L.; SAKAE, R. S.; CRIADO, P. M.; PARADA, P. L.; ZIN, W. A.; BÖHM, G. M. Respiratory alterations due to urban air pollution: An experimental study in rats. *Environmental Research*, v. 57, 1992. ISSN 10960953.
- SANTOS, M. R. F. dos. *Padrões da qualidade do ar durante a paralisação nacional dos caminhoneiros no ano de 2018, no município de Canoas - RS*. 2021. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SASSYKOVA, L. R.; AUBAKIROV, Y. A.; SENDILVELAN, S.; TASHMUKHAMBE TOVA, Z. K.; FAIZULLAEVA, M. F.; BHASKAR, K.; BATYRBAYEVA, A. A.; RYS-KALIYEVA, R. G.; TYUSSYUPOVA, B. B.; ZHAKUPOVA, A. A.; SARYBAYEV, M. A. The main components of vehicle exhaust gases and their effective catalytic neutralization. *Oriental Journal of Chemistry*, v. 35, 2019. ISSN 0970020X.
- SAVIAN, M. C. B. *Perfil das internações por doenças respiratórias ocorridas no Rio Grande do Sul: uma comparação entre o período anterior (2015-2019) e inicial da pandemia por coronavírus (2020)*. 2021. Monografia (Especialização) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SCHLESINGER, R. B. Sulfur oxides. *Comprehensive Toxicology, Second Edition*, Elsevier, v. 8, p. 277–290, 1 2010.
- SHI, Q.; WU, J. Review on sulfur compounds in petroleum and its products: State-of-the-art and perspectives. *Energy and Fuels*, v. 35, 2021. ISSN 15205029.
- SIE Brasil. *Sistema de Informações Energéticas (SIE Brasil)*. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/sistema-de-informacoes-energeticas-sie-brasil-1>>. Acesso em: 26/08/2023.

- SILVA, K. L. ávila da; ALONSO, M. F.; MOURA, S. F. de; FILHO, T. F. V. Estudo da dispersão do monóxido de carbono associado a emissão veicular na região metropolitana de porto alegre com o sistema de modelagem numérica ccatt - brams. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, 2021. ISSN 0102-7786.
- SOLIANI, R. D.; ARGOUD, A. R. T. T. The emission of polluting gases in brazilian road freight transport. *Espacios*, v. 39, 2018. ISSN 07981015.
- SPIRIC, V. T.; JANKOVIC, S.; VRANEŠ, A. J.; MAKSIMOVIC, J.; MAKSIMOVIC, N. The impact of air pollution on chronic respiratory diseases. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 21, 2012. ISSN 12301485.
- STANISLAUS, A.; MARAFI, A.; RANA, M. S. Recent advances in the science and technology of ultra low sulfur diesel (ulsd) production. *Catalysis Today*, v. 153, 2010. ISSN 09205861.
- THURSTON, G. D. Outdoor air pollution: Sources, atmospheric transport, and human health effects. In: _____. *International Encyclopedia of Public Health*. [S.l.]: Academic Press, 2008. p. 327–339. ISBN 978-0-12-373960-5.
- UOL. *Petrobras vende 1ª carga de diesel R5 para testes; aguarda regulamentação*. 2022. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/noticias/reuters/2022/09/29/petrobras-vende-1-carga-de-diesel-r5-para-testes-aguarda-regulamentacao.htm>>. Acesso em: 08/10/2023.
- U.S. Energy Information Administration. *Diesel fuel explained*. 2022. Disponível em: <<https://www.eia.gov/energyexplained/diesel-fuel/diesel-and-the-environment.php>>. Acesso em: 23/08/2023.
- VELASCO, R. P.; JAROSINSKA, D. Update of the who global air quality guidelines: Systematic reviews – an introduction. *Environment International*, v. 170, 2022. ISSN 18736750.
- WADE, J.; FARRAUTO, R. J. Controlling emissions of pollutants in urban areas. *Metropolitan Sustainability: Understanding and Improving the Urban Environment*, Woodhead Publishing, p. 260–291, 1 2012.
- WALLINGTON, T. J.; ANDERSON, J. E.; DOLAN, R. H.; WINKLER, S. L. Vehicle emissions and urban air quality: 60 years of progress. *Atmosphere*, v. 13, 2022. ISSN 20734433.
- WANG, X.; DENG, X.; WU, Y.; QIAN, Z.; CAI, M.; LI, H.; LIN, H. Low-level ambient sulfur dioxide exposure and genetic susceptibility associated with incidence of idiopathic pulmonary fibrosis: A national prospective cohort study. *Chemosphere*, v. 337, 2023. ISSN 18791298.
- WARE, J. H.; THIBODEAU, L. A.; SPEIZER, E. Assessment of the health effects of atmospheric sulfur oxides and particulate matter: Evidence from observational studies. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 41, 1981. ISSN 00916765.

- World Health Organization. *9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action*. 2018. Disponível em: <<https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>>. Acesso em: 08/09/2023.
- WU, Y. C.; LIN, Y. C.; YU, H. L.; CHEN, J. H.; CHEN, T. F.; SUN, Y.; WEN, L. L.; YIP, P. K.; CHU, Y. M.; CHEN, Y. C. Association between air pollutants and dementia risk in the elderly. *Alzheimer's and Dementia: Diagnosis, Assessment and Disease Monitoring*, v. 1, 2015. ISSN 23528729.
- YANG, D.; ZHANG, S.; NIU, T.; WANG, Y.; XU, H.; ZHANG, K. M.; WU, Y. High-resolution mapping of vehicle emissions of atmospheric pollutants based on large-scale, real-world traffic datasets. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 19, p. 8831–8843, 7 2019. ISSN 1680-7324. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/19/8831/2019/>>.
- ZHANG, H.; GAO, R.; LI, H.; LI, Y.; XU, Y.; CHAI, F. Formation mechanism of typical aromatic sulfuric anhydrides and their potential role in atmospheric nucleation process. *Journal of Environmental Sciences (China)*, v. 123, 2023. ISSN 18787320.
- ZHOU, X.; GAO, Y.; WANG, D.; CHEN, W.; ZHANG, X. Association between sulfur dioxide and daily inpatient visits with respiratory diseases in ganzhou, china: A time series study based on hospital data. *Frontiers in Public Health*, v. 10, 2022. ISSN 22962565.

Apêndice A

Qualidade do ar no RS

A.1 Estações de monitoramento FEPAM

Nesta seção são apresentadas as características e a contextualização de cada uma das estações de monitoramento automático da qualidade do ar consideradas neste trabalho. As descrições foram adaptadas conforme divulgado nos Relatórios de Qualidade do Ar pela FEPAM (2023).

TABELA A.1. Descrição das Estações FEPAM.

Estação	Descrição
Canoas (PU)	Estação pertencente à Refinaria Alberto Pasqualini (Refap), localizada a 2 km à montante do vento predominante (SE) em relação a esta. Tem proximidade com outras indústrias. Em seu entorno existe ainda a ocupação urbana para moradia. Sofre influência industrial e, em segundo plano, urbana.
Esteio (VE)	Estação pertencente à Refap, localizada a 1,5 km a jusante do vento predominante em relação a esta, além de outras indústrias. Em seu entorno existe ainda influência de vias de intenso tráfego (rodovia BR-116) de caminhões, ônibus e automóveis, e a ocupação urbana para moradia. Sofre influência industrial e veicular e, em menor grau, urbana.
Triunfo (Polo)	Estação pertencente à Braskem, localizada em área próxima ao Polo Petroquímico do Sul (Polo), com forte influência industrial das empresas petroquímicas do Polo.

Estação	Descrição
Triunfo (DEPREC)	Estação pertencente à Tractebel Energia, instalada a cerca de 7 km a jusante do vento predominante (E) em relação à usina de energia pertencente a esta, em área de bosque. Apresenta influência industrial. Deve ser considerado também que o município de Triunfo localiza-se à jusante do vento predominante (cerca de 47 km) em relação à RMPA, e sofre influência da pluma de poluentes atmosféricos emitidos por esta.
Gravataí (JT)	Estação localizada junto ao bairro residencial Jardim Timbaúva, na periferia da cidade, com pouco trânsito de veículos. Está a aproximadamente 7 km a jusante do vento predominante (SE) em relação à General Motors do Brasil (GM), além de outras empresas em distâncias menores. Apresenta influência industrial e urbana.
Charqueadas (AT)	Estação pertencente à Tractebel Energia, instalada a cerca de 700 m à jusante do vento predominante (E), em relação à usina de energia pertencente a esta, e dentro do perímetro urbano de Charqueadas, próximo ao centro. Apresenta influência industrial e, em segundo plano, urbana. Deve ser considerado também que o município de Charqueadas localiza-se à jusante do vento predominante (cerca de 40 km) em relação à RMPA, e sofre influência da pluma de poluentes atmosféricos emitidos por esta indústria.
Guaíba (Parque 35)	Estação pertencente à Celulose Riograndense (CMPC), instalada a aproximadamente 2,5 km à jusante do vento predominante (SE) em relação a esta indústria. Fica em área com baixa densidade populacional, sofrendo com forte influência industrial e moderada influência urbana, devido à proximidade do centro de Guaíba (1,5 km a leste) e da pluma urbana representada pela zona sul de Porto Alegre (na outra margem do Lago Guaíba).

A.2 Concentração atmosférica média de SO₂ e PI₁₀

As concentrações atmosféricas dos poluentes foram também obtidas a partir dos Relatórios de Qualidade do Ar pela FEPAM (2023) e tabuladas conforme apresentado nas Tabelas A.2 e A.3.

TABELA A.2. Concentração média diária anual de SO₂ (μg/m³).

Ano	Canoas (PU)	Esteio (VE)	Triunfo (polo)	Triunfo (DEPREC)	Gravataí (JT)	Charqueadas (AT)	Guaíba (P35)
2012	2,0	5,8	-	10,1*	0,7*	14,9*	-
2013	1,5	2,8	-	11,6	0,7*	12,6	-
2014	1,3	5,1	-	15,6	0,8*	15,2	2,7*
2015	0,7*	1,5*	-	19,7*	1,2	16,4	2,0
2016	11,7	10,1	1,7*	5,7	1,3*	2,9	1,7
2017	7,6	17,1	1,4	16,2	1,3	11,7	1,0
2018	12,3	9,2	1,5*	25,1*	1,3	5,6	1,1
2019	16,4	19,8*	1,3	-	1,3*	-	1,2

* Valores que não atenderam a representatividade do ano.

TABELA A.3. Concentração média diária anual de PI_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ano	Canoas (PU)	Esteio (VE)	Triunfo (polo)	Triunfo (DEPREC)	Gravataí (JT)	Charqueadas (AT)	Guaíba (P35)
2012	36,9	27,1*	-	-	-	33,9	-
2013	33,4	-	-	-	17,2*	31,8	-
2014	29,1	-	-	-	16,3	28,8	28,2*
2015	25,5	24,2	-	-	14,6	27,1*	25,1
2016	24,7	21,2	13,8*	-	16,9	29,8	25,0
2017	24,1	22,7	13,2	-	17,4	26,6*	35,3
2018	20,8	16,9	11,7*	-	15,3	37,2	25,2
2019	21,9	16,0*	20,4*	-	16,9	-	26,9

* Valores que não atenderam a representatividade do ano.

Apêndice B

Teor de biodiesel no diesel A

Conforme o Art. 2. da ANP n.º 65/2011:

“Para efeitos desta Resolução o óleo diesel de uso rodoviário classifica-se em: I - Óleo diesel A: combustível produzido por processos de refino de petróleo, centrais de matérias-primas petroquímicas ou autorizado nos termos do § 1º do Art. 1º desta Resolução, destinado a veículos dotados de motores do ciclo Diesel, de uso rodoviário, sem adição de biodiesel; II - Óleo diesel B: óleo diesel A adicionado de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente.”

No transporte rodoviário, tal resolução implementa as vendas unicamente do diesel B. Os padrões para a comercialização das misturas com biodiesel seguem conforme estipulado pela ANP (2023b) e apresentado Tabela B.

TABELA B.1. Percentual de biodiesel no diesel por período.

Período	Percentual de biodiesel no diesel (v/v)
2004	Experimental
Jan/2005 a Dez/2007	2% (facultativo)
Jan/2008 a Jun/2008	2%
Jul/2008 a Jun/2009	3%
Jul/2009 a Dez/2009	4%
Jan/2010 a Jun/2014	5%
Jul/2014 a Out/2014	6%
Nov/2014 a Fev/2017	7%
Mar/2017 a Fev/2018	8%
Mar/2018 a Ago/2019	10%
Set/2019 a Fev/2020	11%
Mar/2020 a Ago/2020	12%

Período	Percentual de biodiesel no diesel (v/v)
Set/2020 a Out/2020	10%
Nov/2020 a Dez/2020	11%
Jan/2021 a Fev/2021	12%
Mar/2021 a Abr/2021	13%
Mai/2021 a Ago/2021	10%
Set/2021 a Out/2021	12%
Nov/2021 a Mar/2023	10%
Abr/2023 a Mar/2024	12%

Apêndice C

Estimativa de enxofre no diesel comercializado

Nesta seção é apresentado o resumo dos valores obtidos a partir do emprego do procedimento descrito em 3.4.1, que objetivou, sobretudo, estimar a massa total de enxofre contida no diesel (segmento rodoviário) comercializado no RS entre o período de 2012 a 2021. O percentual de biodiesel no diesel em um determinado ano foi estipulado como a média ponderada, conforme o tempo de vigência, dos valores apresentados na Tabela B. Com base na quantidade volumétrica de diesel A obtida e considerando a participação de mercado de cada tipo de diesel no ano, conforme a Tabela 3.3, foi possível inferir a quantidade de enxofre associada à combinação do tipo de diesel e seu volume de vendas.

TABELA C.1. Estimativa do teor mássico total de enxofre no diesel rodoviário comercializado no RS.

Ano	Venda diesel (segmento rodoviário) (mil m³)	Biodiesel no diesel (% (v/v))	Correção venda (remoção volume biodiesel) (mil m³)	Massa de enxofre estimada (t)
2012	293,91	5,00%	279,21	275,84
2013	296,12	5,00%	281,31	277,92
2014	283,90	5,67%	267,81	92,04
2015	285,19	7,00%	265,22	88,25
2016	285,76	7,00%	265,76	85,82
2017	296,74	7,83%	273,50	85,55
2018	254,86	9,67%	230,22	68,59
2019	334,64	10,33%	300,06	80,06
2020	282,61	11,33%	250,58	59,21
2021	258,55	11,17%	229,68	47,39

Apêndice D

Perfil anual de internações

Esta seção visa apresentar o perfil de internações no SUS ao longo dos meses para cada um dos anos do estudo, de forma complementar ao resultado apresentado na Figura 4.4. Tal detalhamento foi obtido conforme descrito em 3.4.2. A Figura D.1 apresenta a quantidade total agregada de internações em nível estadual, considerando os CIDs pertencentes aos Capítulo X (Doenças do Aparelho Respiratório, J00 - J99). Nela, verificam-se padrões recorrentes no que se refere ao comportamento das taxas de internações. As maiores taxas são observadas durante os meses mais frios do ano, em especial, o mês de julho foi o mês com a maior quantidade de internações, à exceção do ano de 2017. Nos meses quentes são reportadas as menores taxas de internações, principalmente durante os meses de dezembro a fevereiro. Observa-se que a média mensal anual de internações respiratórias apresentou um comportamento de queda contínuo a partir do ano de 2016, atingindo o seu menor valor no ano de 2019.

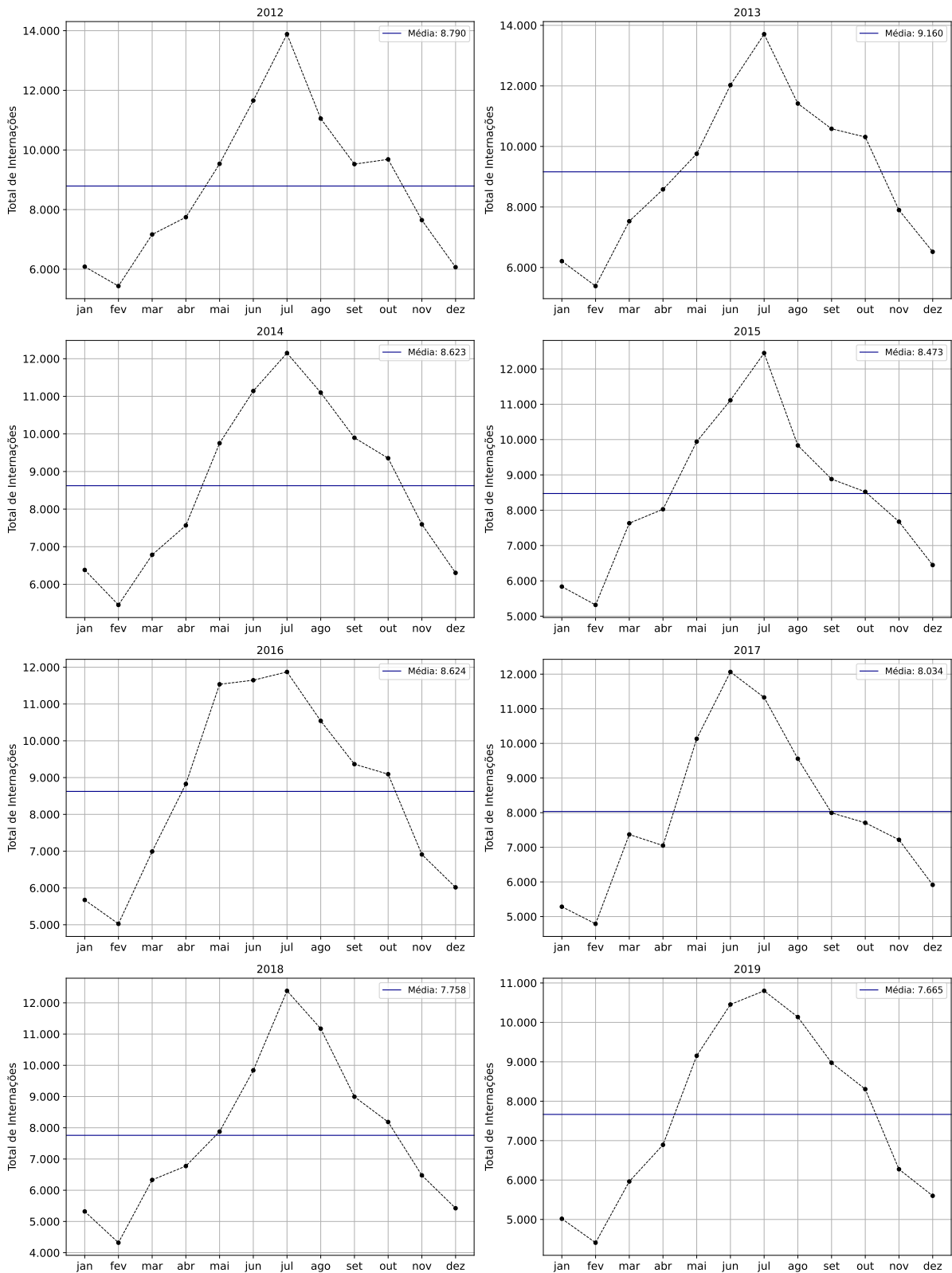


FIGURA D.1. Perfil anual de internações respiratórias no SUS no RS.