



Avaliação do impacto dos grandes navios de cruzeiros no Porto de Lisboa na qualidade do ar da cidade

RODRIGO FERREIRA RAMOS
(Licenciado em Engenharia Química e Biológica)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química e Biológica, na
Área de Especialização de Processos Químicos

Orientadores:

Doutora Ana Maria G. H. Barreiros Joanaz de Melo
Doutor Manuel José de Matos

Júri:

Presidente: Doutor José Augusto Paixão Coelho
Vogais: Doutora Cristina Maria Roque Ramiro Oliveira
Doutor Nelson Alberto Frade da Silva
Doutora Ana Maria G. H. Barreiros Joanaz de Melo

novembro 2024

Avaliação do impacto dos grandes navios de cruzeiros no Porto de Lisboa na qualidade do ar da cidade

RODRIGO FERREIRA RAMOS
(Licenciado em Engenharia Química e Biológica)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química e Biológica, na
Área de Especialização de Processos Químicos

Orientadores:

Doutora Ana Maria G. H. Barreiros Joanaz de Melo (ISEL-IPL)
Doutor Manuel José de Matos (ISEL-IPL)

Júri:

Presidente: Doutor José Augusto Paixão Coelho (ISEL-IPL)
Vogais: Doutora Cristina Maria Roque Ramiro Oliveira (FC-UL)
Doutor Nelson Alberto Frade da Silva (ISEL-IPL)
Doutora Ana Maria G. H. Barreiros Joanaz de Melo (ISEL-IPL)

novembro 2024

*“Genius is 1% talent and 99% percent hard work. Everybody is a genius. But if you judge a fish by its ability to climb a tree, it will live its whole life believing that it is stupid”. – **Albert Einstein***

Agradecimentos

A escrita deste trabalho foi marcada por alegria, risos, novas amizades, aprendizagens e momentos que levarei no meu coração para sempre. No entanto, nem tudo foram maravilhas. Durante a elaboração deste documento, enfrentei alguns dos momentos mais difíceis da minha vida. Problemas de saúde, escolhas ingratas, noites em claro, cansaço, ansiedade e, em certos momentos, um grande desespero e medo do futuro e da imperfeição. Foi nesses momentos que as pessoas que mencionarei a seguir me ajudaram a superar todos os desafios, dando um significado inestimável a este trabalho, independentemente de como ele termine.

Um agradecimento muito especial à Doutora Ana Maria Barreiros e ao Doutor Manuel José de Matos, que me acompanharam ao longo deste trabalho. Agradeço pela disponibilidade, simpatia, orientação, incentivo e perseverança, mas especialmente pela paciência com as várias versões do meu texto, que muitas vezes estava desorganizado, e por toda a ajuda e compreensão. Um agradecimento especial à Doutora Ana Maria Barreiros, que foi mais do que uma orientadora durante a realização deste trabalho, e por nunca ter desistido de mim, acreditando nas minhas capacidades mesmo quando eu próprio duvidei delas.

Um grande agradecimento a toda a organização do Porto de Lisboa por me ter dado esta oportunidade, em especial à Engenheira Vera Godinho, pela ajuda e orientação durante os meses em que trabalhei nas instalações da Administração do Porto de Lisboa.

A todos os meus companheiros de turma, pela ajuda, apoio, risos, paciência e alegria que me deram ao longo de todos estes anos que passámos juntos. A todas as chamadas em vésperas de testes e exames que fizemos e que, sem dúvida, nos ajudaram a terminar o curso. Este trabalho também tem o vosso toque, pois ajudaram-me a ser quem sou hoje. Um grande obrigado ao André Cabrita, Mariana Matos, Inês Correia, Rita Lopes, Raquel Figueiredo, Raul Alves, Bárbara Miranda, Catarina Domingos, Vanessa Ferrer e Filipa Luís.

Aos meus afilhados e companheiros do ISEL, Mafalda Silva, João Lopes e José Tiago Costa, a minha gratidão por todas as alegrias e orgulhos que me deram ao longo do meu percurso académico. A todos os momentos em que me viram rir e chorar, que me

abraçaram, pela ajuda e apoio prestados e por todos os momentos incansáveis de motivação.

O meu sincero agradecimento ao meu grupo de amigos da LVSITIR, que me viram a trabalhar arduamente e que nunca deixaram de estar lá para mim quando eu mais precisei. Um grande obrigado por todos os sorrisos que me proporcionaram, noites de loucura e por curarem o cansaço, ansiedade e desespero, mesmo sem saberem. Um grande obrigado ao Vasco Machado, Luís Alexandre, Simão Carrasco, Tiago Faustino, Miguel Pais e Rafael Lino dos Santos.

Gostaria também de agradecer aos meus melhores amigos, que tenho orgulho de chamar de pais. Agradeço pelo apoio incondicional, conselhos, paciência, amor e motivação que me deram ao longo desta etapa. Agradeço por todas as lágrimas que me ajudaram a secar e por todas as palavras que foram essenciais para continuar e terminar esta jornada. Agradeço também ao meu irmão, que sempre foi uma das minhas maiores inspirações em tudo o que fiz e por ser um dos meus ídolos desde pequeno. Um grande obrigado à minha mãe, Angelina Soares Domingos Ferreira Ramos, ao meu pai, Pedro Ricardo Xavier Correia Ramos, e ao meu irmão, André Ferreira Ramos.

Agradeço à minha namorada pelo apoio incondicional, amor, paciência e ajuda na escrita deste documento. Um grande obrigado por todas as vezes que ficou à minha espera no carro enquanto eu fazia as inspeções, por cada palavra que corrigiu neste trabalho, por todas as vezes que me ouviu desabafar, por toda a ansiedade que ajudou a aliviar e por todas as noites em branco que me acompanhou. Foste a pessoa que mais me acompanhou durante toda esta etapa, e por isso deixo o meu grande obrigado à Patrícia Glória Heliodoro.

Declaração de integridade

Declaro que este relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor



Lisboa, 19 de novembro de 2024

Resumo

O turismo de cruzeiros é um setor turístico que combina lazer, desporto, educação e outros serviços. Desde os anos 60, tornou-se um setor relevante para a economia global, impulsionando o turismo e o consumo local. Contudo, os impactos ambientais são significativos, com elevadas emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (GEE), afetando a qualidade do ar e contribuindo para o aquecimento global. Desta forma, este trabalho pretendeu identificar e avaliar o impacto destes navios na qualidade do ar da cidade de Lisboa.

Este trabalho foi desenvolvido na Administração do Porto de Lisboa (APL), que possibilitou recolher dados de diversas fontes. Foram realizadas inspeções em navios de cruzeiro para identificar características gerais, consumo de combustível, uso de *scrubbers*, gestão de resíduos e as próprias emissões. Foram utilizados também relatórios da empresa *SondarLab* que contemplaram informações meteorológicas e medições horárias de poluentes em estações próximas ao porto.

Outras fontes incluíram a plataforma Janela Única Logística (JUL), que forneceu dados técnicos sobre os navios, a Vessel Traffic Services (VTS), que registou horários estratégicos da movimentação destes navios e uma estação meteorológica complementar.

O tratamento estatístico avaliou a representatividade da amostra, enquanto o modelo de pluma Gaussiana, parametrizado no Excel, permitiu prever e quantificar o impacto das emissões. Os resultados foram comparados com os dados reais, tendo sido realizada uma análise detalhada dos efeitos dos cruzeiros na qualidade do ar da cidade.

Foi possível verificar que a grande maioria dos poluentes estão em conformidade com os valores guia da Organização Mundial de Saúde (OMS) e com as normas da União Europeia (EU). Concluiu-se que os navios de cruzeiro têm um impacto negativo na qualidade do ar, mas não o suficiente para diminuí-la, sendo o tráfego rodoviário a maior fonte de poluição da cidade de Lisboa.

Palavras-chave: Navios de cruzeiro, Poluição atmosférica; Poluentes; Monitorização; Qualidade do ar

Abstract

Cruise tourism is a sector that combines leisure, sports, education, and other services. Since the 1960s, it has become a significant contributor to the global economy, boosting tourism and local consumption. However, its environmental impacts are substantial, with high emissions of air pollutants and greenhouse gases (GHGs) affecting air quality and contributing to global warming. This study aimed to identify and assess the impact of cruise ships on the air quality of Lisbon.

This work was conducted in collaboration with the Administration of the Port of Lisbon (APL), which facilitated the collection of data from various sources. Inspections were carried out on cruise ships to gather information on general characteristics, fuel consumption, scrubber use, waste management, and emissions. Additionally, reports from SondarLab provided meteorological data and hourly pollutant measurements from stations near the port.

Other data sources included the Janela Única de Logística (JUL) platform, which supplied technical details about the ships, and the Vessel Traffic Services (VTS), which recorded strategic timelines of ship movements, complemented by a nearby meteorological station.

Statistical analysis evaluated the sample's representativeness, and a Gaussian plume model, parameterized in Excel, was used to predict and quantify the emission impacts. The results were compared with real data, followed by a detailed analysis of cruise ship effects on Lisbon's air quality.

The findings revealed that the majority of pollutants were within the World Health Organization (WHO) guideline values and the European Union (EU) standards. The study concluded that while cruise ships negatively affect air quality, their impact is not significant enough to cause a substantial decline. Instead, road traffic remains the primary source of pollution in Lisbon.

Keywords: Cruise Ships; Air pollution; Pollutants; Monitorization; Air quality

Produção Científica

Poster e artigo em conferência internacional:

Ramos, R.F; Barreiros, A.M. (2024) "Cruise ships inspections, a Contribution to sustainability". ICoWEFS 2024, 8-10 maio, Portalegre, Portugal. ICoWEFS 2024 Sustainability Proceedings, <https://www.springer.com/series/15734>.

Poster em encontro nacional:

Ramos, R.F; Barreiros, A.M. (2024) "Cruise ships inspections, a Contribution to sustainability" Fórum de Engenharia Química e Biológica, 2024,7-10 de maio, Lisboa, Portugal.

Índice

Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Metodologia.....	3
Capítulo 2 Transporte Marítimo de Passageiros	5
2.1. Tipos de motores.....	7
2.1.1. Classificação dos motores quanto ao funcionamento	8
2.1.2. Classificação pelas velocidades.....	10
2.1.3. Consumo de combustível.....	12
2.2. Combustíveis Tradicionais	15
2.3. Combustíveis Alternativos	15
2.4. Estratégias para a redução de emissões.....	18
2.4.1. <i>Scrubbers</i>	19
2.4.2. Sistemas de propulsão alternativa	21
2.4.3. Estratégias Operativas.....	25
2.5.5. Medidas portuárias	25
Capítulo 3 Qualidade do ar e poluentes.....	28
3.1. Aspetos Ambientais.....	28
3.2. Qualidade do ar	29
3.3. Poluentes e seus Impactos.....	35
3.3.1. PM ₁₀ e PM _{2,5}	36
3.3.2. Óxidos de enxofre	37
3.3.3. Óxidos de azoto.....	38
3.3.4. Monóxido de Carbono	40
3.3.5. Ozono.....	40

3.3.6.	Gases com Efeito de Estufa	41
3.4.	Restrições, legislação e controlo	42
3.4.1.	Recomendações Internacionais.....	42
3.4.2.	Legislação europeia.....	49
3.4.3.	Legislação Nacional.....	51
3.4.4.	Regulamentação do Porto de Lisboa.....	56
Capítulo 4	Modelos de dispersão de poluentes.....	58
4.1.	Modelos de Caixa	58
4.2.	Modelos de Janela	59
4.3.	Modelo de Pluma Gaussianos.....	60
4.4.	Modelos Eulerianos.....	63
4.5.	Modelo Escolhido.....	64
Capítulo 5	Caso de Estudo	65
5.1.	História do Porto de Lisboa	65
5.2.	Impacto dos navios de Cruzeiro na cidade de Lisboa.....	68
5.3.	Dados recolhidos e caracterização da amostra	71
5.3.1.	Inspeções a Navios	71
5.3.2.	<i>SondarLab</i>	71
5.3.3.	Outras Fontes de Dados.....	73
5.3.4.	Pressupostos	74
5.3.5.	Caracterização da amostra	76
5.3.6.	Características dos navios inspecionados.....	78
Capítulo 6	Resultados e Discussão	83
6.1.	Tratamento dos dados	83
6.1.1.	Correlação dos dados recolhidos.....	84
6.2.2.	Poluição média	87
6.2.3.	Previsões de Leitura	96
6.2.4.	Dispersão dos Poluentes	97

6.2.5. Comparação entre poluição rodoviária e poluição originada pelos navios de cruzeiro.....	101
Capítulo 7 Conclusões e Perspetivas Futuras.....	105
Bibliografia	111
Anexos	118

Índice de Figuras

Figura 1 – Impacto dos navios de cruzeiro nos ecossistemas marinhos e urbanos e nas pessoas (Adaptado de Moreno-Gutiérrez <i>et al.</i> , 2019).	6
Figura 2 -Etapas do funcionamento de um motor a 4 tempos (Adaptado de Breeze, 2018).	8
Figura 3 - Etapas do funcionamento de um motor a 2 tempos (Adaptado Okubo & Kuwahara, 2020).	9
Figura 4 – Consumo de combustíveis convencionais e alternativos pelos navios (Adaptado de IMO, 2024a).....	12
Figura 5 - Número de navios a nível mundial que utilizam combustíveis alternativos e o combustível que utilizam (Adaptado de Adams, 2013 e Fontelle <i>et al.</i> , 2023).	13
Figura 6 - Utilização de cada tipo de combustível em cada tipo de navio (Adaptado de IMO, 2022).....	13
Figura 7 - Etapas na atracação e saída de navios de porto, (Adaptado de Zis, 2019).	14
Figura 8 - Aumento da quantidade de navios que se encontram equipados com scrubbers (Adaptado de Transport & Environment, 2023).....	21
Figura 9 – Tecnologia de velas de rotor (Abs & Delft, 2023).	22
Figura 10 - Tecnologia de velas rígidas (Abs & Delft, 2023).....	23
Figura 11 – Tecnologia de asas de sucção (Abs & Delft, 2023).	23
Figura 12 - Tecnologia de <i>kite</i> (Abs & Delft, 2023).	24
Figura 13 - Sistema de fornecimento de energia a navios <i>onshore</i> (Adaptado de Ormazabal, 2024).	26
Figura 14 - Impactos da poluição originada por navios de cruzeiro (Adaptado de Jägerbrand <i>et al.</i> , 2019).....	29
Figura 15 - Impactos dos poluentes emitidos pelos navios na saúde humana, (Adaptado de EEA, 2023).	31
Figura 16 - Evolução da magnitude relativa aos poluentes emitidos por transportes, de 1990 a 2021 (European Environment Agency, 2023).....	32
Figura 17 – Melhorias dos diversos meios de transportes europeus a nível da emissões entre 1990 e 2021 (European Environment Agency, 2023).....	34
Figura 18 - Contribuição das emissões de NO _x , SO _x e PM ₁₀ efetuadas por navios na Europa e em Portugal (Monteiro <i>et al.</i> , 2018).....	35
Figura 19 - Esquema reacional da formação de SO ₂ e chuvas ácidas (Adaptado de Okubo & Kuwahara, 2020).....	38
Figura 20 - Esquema reacional da formação de NO ₂ e chuvas ácidas (Adaptado de Okubo & Kuwahara, 2020).....	39

Figura 21 - Esquema reacional para a formação de NO ₂ e partículas (Adaptado de Okubo & Kuwahara, 2020).....	39
Figura 22 - Limites de enxofre nos combustíveis navais em diversos locais do mundo, (Adaptado de Mallidis <i>et al.</i> , 2020).....	48
Figura 23 - Comparação entre a população europeia exposta a concentrações nocivas dos poluentes PM _{2,5} , PM ₁₀ , O ₃ e NO ₂ , segundo os valores limites em vigor e segundo as recomendações da OMS, Adaptado de Conselho Europeu & Conselho da União Europeia, 2024.....	50
Figura 24 - Método de cálculo do Índice QualAr (APA, 2021a).	53
Figura 25 -Ilustração do modelo de caixa (Adaptado de Valero, 2019)	58
Figura 26 - Formas que o modelo da curva Gaussiana prevê que a pluma possa adotar (Valero, 2019).	60
Figura 27 - Dispersão prevista pela curva Gaussiana (Adaptado de Valero, 2019).61	
Figura 28 - Gare Marítima da Rocha (1947) e painéis de Almada Negreiros da Gare Marítima da Rocha (APL, 2023d).....	66
Figura 29 - Torre VTS 2003 (APL, 2023d).....	67
Figura 30 - Terminal de cruzeiros (APL, 2023d).....	67
Figura 31 - Localização da Gare Marítima da Rocha e o Terminal de Cruzeiros de Lisboa (Adaptado de APL, 2024a).	68
Figura 32 - Localização das estações utilizadas pela SondarLab.....	72
Figura 33 - Localização dos vários sensores em estudo, (Adaptado de Google Earth, n.d.).	72
Figura 34 - Trajeto efetuado pelos navios de cruzeiro ao entrarem/saírem da área jurídica do Porto de Lisboa, (Adaptado de Google Earth, n.d.).....	75
Figura 35 - Número de total de navios que passaram pelo porto de Lisboa e número de navios inspecionados entre fevereiro e setembro.	76
Figura 36 - Relação dos navios inspecionados e a quantidade de escalas que os mesmos realizaram.....	77
Figura 37 - Horários de chegada dos navios ao terminal de cruzeiros de Lisboa. ..77	
Figura 38 - Frequência de tonelage dos navios inspecionados.	78
Figura 39 - Relação entre o GT (kton) médio dos navios com o combustível utilizado.	79
Figura 40 - Relação entre os navios inspecionados e o tipo de combustível que estes usam.....	79
Figura 41 - Consumos médios (ton/h) dos navios de cruzeiro para cada tipo de combustível.....	80
Figura 42 - Consumo médio dos combustíveis por tonelada de navio para cada tipo de combustível na entrada, saída e atracação.....	81
Figura 43 - a) Caudal de emissão dos poluentes por tonelada de navio durante as manobras, b) Caudal de emissão dos poluentes por tonelada de navio enquanto atracado.....	81
Figura 44 – Variação da concentração de CO ao longo do mês de julho tendo em conta a) Tonelage dos navios, b) Consumo dos navios.	84

Figura 45 - Variação da concentração de CO ao longo do mês de julho tendo em conta a) Tonelagem dos navios, b) Consumo dos navios.....	85
Figura 46 - Relação entre a concentração do poluente CO e o consumo de combustível.....	87
Figura 47 – Concentração média diária nos dias de semana, medidos pelo sensor "Estação Física" da SondarLab ao longo do mês de julho: a) CO; b) NO _x ; c) SO _x ; d) PM ₁₀ ; e) PM _{2,5}	88
Figura 48 - Concentração média diária nos dias de fim de semana, medidos pelo sensor "Estação Física" da SondarLab ao longo do mês de julho: a) CO; b) NO _x ; c) SO _x ; d) PM ₁₀ ; e) PM _{2,5}	90
Figura 49 - Resultado da estação de monitorização dos "Olivais" numa terça-feira, com e sem paquetes, a) CO, b) NO _x , c) SO _x , d) PM ₁₀ , e) PM _{2,5}	92
Figura 50 - Resultado da estação de monitorização dos "Olivais" numa quarta-feira, com e sem paquetes, a) CO, b) NO _x , c) SO _x , d) PM ₁₀ , e) PM _{2,5}	93
Figura 51 - Resultado da estação de monitorização dos "Olivais" numa quinta-feira, com e sem paquetes, a) CO, b) NO _x , c) SO _x , d) PM ₁₀ , e) PM _{2,5}	94
Figura 52 - Resultado da estação de monitorização do "Restelo" relativamente ao poluente NO _x , a) Terça-Feira, b) Quarta-Feira, c) Quinta-Feira.	95
Figura 53 - Resultado da estação de monitorização do "Beato" relativamente ao poluente NO _x , a) Terça-Feira, b) Quarta-Feira, c) Quinta-Feira.	95
Figura 54 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores "Estação Física", "P2 Móvel" e "Olivais" numa terça-feira.	98
Figura 55 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores "Estação Física", "P2 Móvel" e "Olivais" numa quarta-feira.	99
Figura 56 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores "Estação Física", "P2 Móvel" e "Olivais" numa quinta-feira.	100
Figura 57 - Número de veículos equivalentes à emissão dos poluentes CO, NO _x , SO _x , PM ₁₀ , PM _{2,5} e CO ₂ , a) Navios a MGO b) Navios HFO com <i>scrubbers</i>	103
Figura 58 - Número de navios equivalentes ao total de veículos que circulam na cidade de Lisboa diariamente em relação à emissão dos poluentes do NO _x , SO _x , PM ₁₀ , PM _{2,5} e CO ₂ , a) Navios a MGO b) Navios HFO com <i>scrubbers</i>	104

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação dos motores dos navios quanto à velocidade de rotação.	11
Tabela 2 - Objetivos e níveis AQG para os vários poluentes.	43
Tabela 3 - Valores limites os principais poluentes estabelecidos pelo Decreto-Lei nº 102/2010 de 23 de setembro.	52
Tabela 4 - Classificação do Índice QALAR para os principais poluentes medidos (APA, 2021a).	53
Tabela 5 - Legislação aplicada quanto teor de enxofre máximo nos combustíveis navais.	55
Tabela 6 - Estabilidade meteorológica de Pasquill.	61
Tabela 7 - Equações de Pasquill para zonas urbanas.	62
Tabela 8 - Valores do expoente p da estabilidade de Pasquill.	62
Tabela 9 - Número de escalas totais e turnaround e número de passageiros de cruzeiros que passaram pelo Porto de Lisboa em 2019, 2022 e 2023 (Adaptado de APL, 2023b e APL, 2024b).	69
Tabela 10 - Dados recolhidos durante as inspeções aos navios de cruzeiro. ..	71
Tabela 11 - Fatores de emissão para cada tipo de combustível (Adams, 2013; Fontelle <i>et al.</i> , 2023).	74
Tabela 12 -Coordenadas dos locais considerados para o estudo. Adaptado de Google Earth.	75
Tabela 13 - Previsão da deteção das emissões dos navios de cruzeiro, pelas estações de monitorização do ar em julho.	97
Tabela 14 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores da “Estação Física”, “P2 Móvel” e “Olivais” numa terça-feira.	98
Tabela 15 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores “Estação Física”, “P2 Móvel” e “Olivais” numa quarta-feira.	99
Tabela 16 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores “Estação Física”, “P2 Móvel” e “Olivais” numa quinta-feira.	100
Tabela 17 - Fatores de emissão utilizados para os automóveis, pesados, navios a MGO e navios a HFO (Fontelle <i>et al.</i> , 2023; Ntziachristos & Samaras, 2019).	102

Glossário

AEA - Agência Europeia do Ambiente
APL - Administração do Porto de Lisboa
AQG - Air Quality Guidelines
ATA - Areias e Tempestades de Areias
CN - Carbono negro
CCDR - Comissão Coordenadora de Desenvolvimento Regional
CCDR LVT - Comissão Coordenadora de Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo
CE - Carbono Elementar
COV - Compostos Orgânicos Voláteis
COVNM - Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos
CPF - Compostos Per Fluorados
DRA - Direções Regionais Autónomas
ECA - Emission Control Area
EGCS - Exhaust Gas Cleaning System
GEE - Gases com Efeito de Estufa
GT - Gross Tonnage
HFC - Hidrofluorcarbonetos
HFO - Heavy Fuel Oil
IAPPC - International Air Pollution Prevention Certificate
IFO - Intermediate Fuel Oil
IMO - International Maritime Organization
JUL - Janela Única Logística
LCP - Lisbon Cruise Port
LL 66 - International Convention on Load Lines
LNG - Liquid Natural Gas
LPG - Liquid Petroleum Gas
LS-MGO - Low Sulphur Marine Gasoil
MARPOL - Marine Pollution
MDO - Marine Diesel Oil
MGO - Marine Gasoil
ODS - Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
OMS - Organização Mundial da Saúde
OPS - On-shore Power Supply
PM - Particulate Matter
PNCPA - Programa Nacional de Controlo da Poluição Atmosférica
PUF - Partículas ultrafinas
Ro-ro - Roll-on/Roll-off
RPM - Rotações por minuto
SAA - Sistemas de atracação automática

SECA - Sulphur Emission Control Area
TCL - Terminal de Cruzeiros de Lisboa
UE - União Europeia
UNCLOS - Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar
UVB - Ultravioleta B
VLSFO - Very Low Sulphur Fuel Oil
VPS - Veritas Petroleum Services
VTS - Vessel Traffic Services
WAPS - Wind-assisted Propulsion System

Capítulo 1

Introdução

1.1. Enquadramento

O turismo de cruzeiros tem por base o transporte de passageiros através de uma determinada rota previamente definida. Logunova *et al.* (2020) define-o como “... o turismo de cruzeiros, que é caracterizado pelo significativo capital investido e intensidade de trabalho, é um tipo de turismo universal que combina quase todas as suas formas e contém vários tipos – recreativo, desporto, melhoramento da saúde, educacional, congressos, aventura, arqueológico, etc., como também combina várias opções de serviço e recreativo.”

A indústria de cruzeiros possuía depois da primeira guerra mundial apenas alguns navios a navegar com fins não recreativos. Nos anos 60 este setor sofreu grandes alterações, havendo um aumento da construção de grandes navios apenas vocacionados para o turismo e entretenimento. Desde então os navios de cruzeiro têm sido uma grande fonte de receita para muitas cidades, aumentando simultaneamente o emprego e o consumismo, divulgando ainda os locais e regiões onde acostam (Smirnov *et al.*, 2022).

Ano após ano, o turismo de cruzeiros tem-se tornado cada vez mais popular, o que conseqüentemente obriga à indústria acompanhar este crescimento. Os navios tornam-se cada vez mais luxuosos e tecnologicamente avançados ao ponto de possuírem tecnologias que tornam o movimento das ondas impercetível para os passageiros. Paralelamente, a crescente procura deste tipo de turismo permite a redução do custo, situação que potencia a sua frequência aumentando cada vez mais o tráfego marítimo (Smirnov *et al.*, 2022).

Os cruzeiros representam uma pequena porção de toda a indústria naval a nível mundial. Contudo, o efeito do seu impacto é desproporcionalmente nocivo à qualidade do ar, habitats e conseqüentemente ao clima. O combustível consumido pelos navios é substancialmente superior à energia utilizada nos hotéis convencionais, devido essencialmente ao consumo de combustível necessário ao funcionamento das instalações de lazer proporcionadas a bordo, para além da energia despendida por todos os equipamentos de navegação. Estes efeitos fazem-se sentir essencialmente na linha de costa, local onde são utilizadas maiores quantidades de combustível durante as manobras de aproximação e atracação. Nos dias de hoje, os cruzeiros continuam a utilizar combustíveis “sujos”, fazendo com que haja grandes emissões de monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_x), óxido de nitrogénio (NO_x) e material particular (PM), em suspensão no ar, cujos efeitos têm tremendos impactos na saúde humana. Com a emissão de grandes quantidades de gases com efeito de estufa (GEE) e carbono negro (CN) existem também impactos ambientais consideráveis relativamente ao aquecimento global. Dependendo do destino do navio, este pode emitir entre 100 a 500 vezes mais compostos de enxofre que um carro normal (Transport & Environment, 2023).fe

Várias têm sido as tentativas de encontrar soluções que permitam diminuir o impacto dos efeitos ambientais nocivos causados pelos cruzeiros, contudo todas as soluções até agora encontradas resultam em outros problemas (Transport & Environment, 2023).

Por exemplo, muitos cruzeiros possuem já equipamentos para o tratamento dos gases de combustão provindos da queima do combustível, ou seja, permitem que grande parte do SO_x não seja emitido para a atmosfera. No entanto, estes equipamentos, denominados por *scrubbers*, utilizam água para lavar estes gases, resultando assim em águas contaminadas que em grande parte dos casos acaba por ser descarregada nas águas oceânicas (Transport & Environment, 2023).

Outra solução encontrada resulta na troca dos combustíveis convencionais por *Liquid Natural Gas* (LNG), reduzindo significativamente a quantidade de poluentes e dióxido de carbono (CO₂) emitidos. Contudo, a utilização de LNG resulta em grandes emissões de metano (CH₄), o qual tem um impacto, a curto prazo, 82,5 superior relativamente ao efeito de estufa provocado atualmente pelo CO₂ (Transport & Environment, 2023).

1.2. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo recolher dados de emissões dos poluentes CO, NO_x, SO_x, PM₁₀ e PM_{2,5} e de gases com efeito de estufa (nomeadamente o CO₂), bem como dados dos sensores existentes na área de influência do Terminal de Cruzeiros de Lisboa (TCL), e identificar o impacto que os cruzeiros têm na qualidade do ar na cidade de Lisboa.

1.3. Metodologia

O trabalho realizado teve por base um estágio profissional na Administração do Porto de Lisboa (APL) onde foram recolhidos dados de diversas fontes. As duas fontes de importação de dados com mais impacto neste estudo foram as inspeções aos navios de cruzeiro e os relatórios da qualidade do ar efetuados pela empresa *SondarLab* (empresa contratada pelo Porto de Lisboa para realizar a monitorização da qualidade do ar). Através das inspeções realizadas aos navios foi possível obter os dados reais dos consumos dos motores e dos equipamentos utilizados pelos mesmos. Os relatórios realizados pela *SondarLab* permitiram a obtenção de dados meteorológicos e a concentração dos poluentes hora a hora em diversas estações colocadas na proximidade do Porto de Lisboa. Recorreu-se ainda a outras fontes de dados, tais como:

- Plataforma logística da APL, denominada por Janela Única Logística (JUL), a qual permitiu a obtenção de dados relacionados com as características gerais dos navios.
- Comandantes da VTS (*Vessel Traffic Services*) que forneceram os horários exatos pela qual os navios passavam por certos pontos estratégicos dentro da área de jurisdição do Porto de Lisboa e uma estação meteorológica que permitiu a obtenção de dados complementares aos fornecidos pela *SondarLab* para realizar a dispersão dos poluentes.

Para além disso durante as inspeções foram recolhidos outros dados de interesse para o Porto de Lisboa, tais como:

- Características gerais dos navios;
- Informações sobre os motores;
- Água de lastro;
- *Scrubbers*;
- Gestão de resíduos;
- Certificações;
- Condições meteorológicas;
- Concentração dos poluentes;
- Horários de navegação

Com os dados recolhidos foi realizado um tratamento estatístico de forma a avaliar se a amostra de navios inspecionados é representativa para o estudo. Por fim, os dados foram tratados com o objetivo de quantificar e avaliar o impacto que os navios de cruzeiro têm na qualidade do ar de Lisboa.

Para realizar a previsão e a quantificação das emissões geradas pelos navios com impacto na qualidade do ar da cidade de Lisboa, adaptou-se o modelo da pluma Gaussiana diretamente ao caso de estudo dos navios no Porto de Lisboa, tendo sido utilizado o software Excel. O Excel foi devidamente parametrizado com as respetivas equações para efetuar todos os cálculos necessários. Após estar devidamente ajustada, foi utilizada para obter resultados comparáveis com os dados reais apresentados ao longo do trabalho.

Capítulo 2

Transporte Marítimo de Passageiros

O transporte marítimo de passageiros em grandes navios de cruzeiro, tornou-se um dos mais populares no setor do turismo, sendo especialmente apreciado pela população Norte Americana e Europeia (Logunova *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2019).

Os navios de cruzeiro, tal como os navios *ferry* são classificados como navios de passageiros. Estes dois tipos de embarcações encontram-se seguidamente definidas:

- **Navios de cruzeiro** – São navios que possuem o propósito de proporcionar aos passageiros uma experiência turística completa. Para além dos camarotes, os passageiros têm à sua disposição vários equipamentos e atividades de lazer a bordo. Os navios que promovam apenas viagens de até à duração de um dia, são excluídos da categoria de cruzeiros (Diretiva 2009/42/CE).
- **Ferryboats (Ferry)** – São navios aptos a transportar periodicamente passageiros, automóveis e/ou camiões e por isso são considerados navios Roll-on/Roll-off de passageiros (Ro-ro) (Diretiva 2009/42/CE; Europeum Consil, 2023).

Devido à sua grande procura, a indústria foi obrigada a evoluir a ritmos elevados, tendo isto resultado em navios cada vez mais avançados tecnologicamente e luxuosos. Contudo, este crescimento fez com que a sustentabilidade deste tipo de turismo se tornasse um paradigma. Segundo o *United Nations Environment Programme & World Trade Organizations* (2016), o turismo é considerado sustentável quando tem em conta os impactos económicos, sociais e ambientais no presente e no futuro indo de encontro com as necessidades dos visitantes, da indústria, do ambiente e das comunidades (Hoarau-Heemstra *et al.*, 2023; Programme & WTO, 2016; Smirnov *et al.*, 2022).

Economicamente, o turismo de cruzeiro mostrou-se capaz de valorizar as cidades costeiras, promovendo o local e aumentando a distribuição de riqueza entre as

diferentes partes interessadas locais, nacionais e internacionais. No entanto, este comércio depende sobretudo da origem dos turistas, do número de dias que o navio permanece em porto e da altura do ano (Hoarau-Heemstra *et al.*, 2023).

Este tipo de turismo também está associado a impactos sociais. A presença dos navios de cruzeiro nas cidades portuárias promove a proliferação cultural e a vitalidade da comunidade, tornando-as mais dinâmicas e socialmente coesas permitindo o desenvolvimento de novas infraestruturas e serviços que as comunidades locais podem beneficiar. Ainda assim, pode ter algumas consequências negativas como a sobre carga turística, o congestionamento das infraestruturas e perda do encanto e da identidade local (Hoarau-Heemstra *et al.*, 2023).

A nível ambiental, a presença dos navios de cruzeiro contribui para o aumento de emissões de poluentes e GEE, piorando a qualidade do ar e levando ao desgaste dos habitats e à intensificação das alterações climáticas (Hoarau-Heemstra *et al.*, 2023; Jägerbrand *et al.*, 2019).

A diminuição da qualidade do ar é uma consequência direta das emissões dos navios devido à queima de combustíveis fósseis nos motores. A emissão dos poluentes tem um impacto direto na saúde pública, na qualidade de vida das cidades e dos ecossistemas marítimos (Figura 1). Para minimizar as emissões é necessário realizar o controlo das mesmas, da energia fornecida e do consumo de combustível em tempo real.

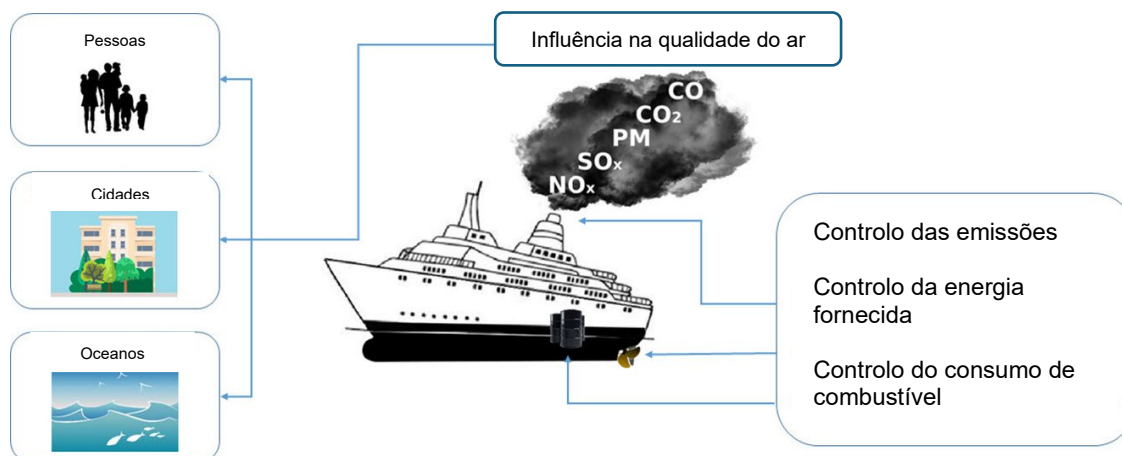


Figura 1 – Impacto dos navios de cruzeiro nos ecossistemas marinhos e urbanos e nas pessoas (Adaptado de Moreno-Gutiérrez *et al.*, 2019).

2.1. Tipos de motores

Grande parte da frota marítima mundial (cerca de 95%) utiliza motores a diesel, sendo que grande parte das emissões tem origem nos motores de propulsão principais e nos motores auxiliares. Para além destas, o navio possui outras fontes emissoras que embora não sejam tão utilizadas também consomem combustível. Estes equipamentos são então os motores de emergência, caldeiras e incineradores (Cullinane & Bergqvist, 2014; ENTEC, 2002; Fontelle *et al.*, 2023).

Os motores de combustão têm como principal função realizar a propulsão do navio em alto mar, tal como as manobras durante a atracação e saída de porto. Geralmente são motores que funcionam a diesel, com a exceção das turbinas de vapor ou gás. Estes podem funcionar a dois tempos (velocidade lenta) e a quatro tempos (velocidade média). Podem ainda ter associado um sistema de propulsão diesel elétrico onde é acionado um gerador elétrico dedicado às hélices (ENTEAC, 2002).

Os motores auxiliares realizam a produção de energia elétrica para as mais diversas funcionalidades a bordo (iluminação, ventilação, bombas, entre outros). Quando o motor principal se encontra em modo diesel-elétrico estes encontram-se geralmente desligados. Os motores auxiliares podem ser motores a quatro tempos de alta velocidade ou velocidade média (ENTEAC, 2002).

Quanto aos motores de emergência, estes têm como objetivo produzir energia elétrica quando necessário em manobras ou na falha de um motor auxiliar. Podem ser motores a quatro tempos de alta velocidade ou velocidade média (ENTEAC, 2002).

Quanto às caldeiras e incineradores, as caldeiras têm como por objetivo realizar a produção de energia térmica para as diversas operações a bordo e os incineradores servem para realizar a queima de resíduos gerados a bordo (ENTEAC, 2002).

Ainda assim, a maior fonte de emissões dos navios de cruzeiro são os motores principais e auxiliares, pelo que estas estão relacionadas com os seguintes fatores (Fontelle *et al.*, 2023; Schwarzkopf *et al.*, 2021):

- 1) Tipo de navio;
- 2) Tipo de motor;
- 3) Tipo de combustível a ser consumido;
- 4) Carga de trabalho dos motores;
- 5) Potência máxima;

Os motores de combustão realizam a transformação da energia térmica gerada pela queima do combustível em energia mecânica, a qual permite que o navio tenha a propulsão necessária para navegar (Babicz *et al.*, 2015).

Os motores podem ser classificados de diversas formas, como por exemplo, pelo alinhamento ou método de arrefecimento dos cilindros, entre outros. Tendo em conta o movimento cíclico dos cilindros, podem também ser classificados como um motor de quatro ciclos (quatro tempos) ou motor de dois ciclos (dois tempos). O termo “ciclo” é a sequência completa de operações que um cilindro necessita de realizar para produzir energia (Okubo & Kuwahara, 2020).

2.1.1. Classificação dos motores quanto ao funcionamento

Um motor a quatro tempos funciona segundo o ciclo Diesel e caracteriza-se em quatro fases (Figura 2):

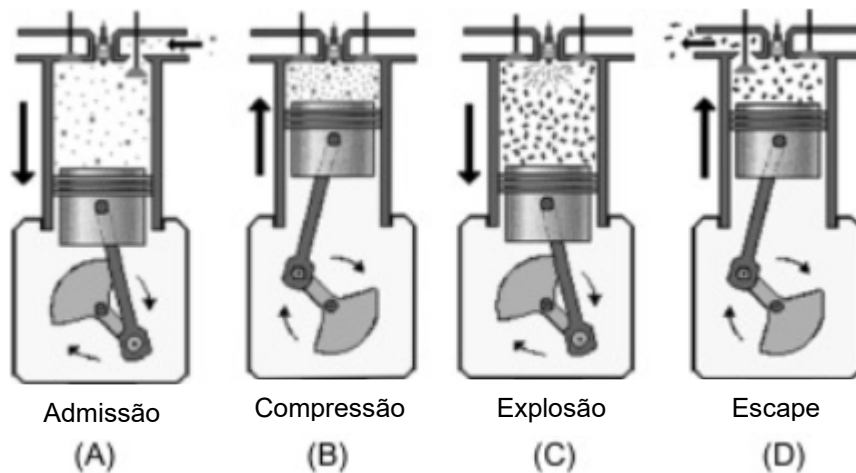


Figura 2 -Etapas do funcionamento de um motor a 4 tempos (Adaptado de Breeze, 2018).

- A) **Admissão (*First Stroke*)**: Nesta primeira etapa o ar entra no cilindro através de sucção causada pela descida do pistão. A válvula de escape encontra-se fechada enquanto a válvula de entrada de ar encontra-se aberta. Nesta etapa, a pressão dentro do cilindro diminui para um valor ligeiramente inferior à pressão atmosférica.

- B) **Compressão (*Second Stroke*)**: Nesta etapa tanto a válvula de admissão como a de escape encontram-se fechadas. O pistão sobe comprimindo o ar dentro do cilindro havendo desta forma um aumento progressivo da pressão no interior do mesmo.
- C) **Explosão (*Third Stroke*)**: Neste processo quando o pistão atinge o limite superior do cilindro é ativado a injeção de combustível. A mistura ar/combustível inflama devido às elevadas pressões. A queima do combustível faz com que o pistão desça havendo uma rápida diminuição na pressão no interior do cilindro.
- D) **Escape (*Fourth Stroke*)**: Na última etapa, antes de o pistão atingir o limite inferior do cilindro, a válvula de escape abre, havendo assim a descarga dos gases de combustão, fechando-se quando o pistão atinge novamente o limite superior (Okubo & Kuwahara, 2020).

O funcionamento do motor a dois tempos encontra-se representado na Figura 3.

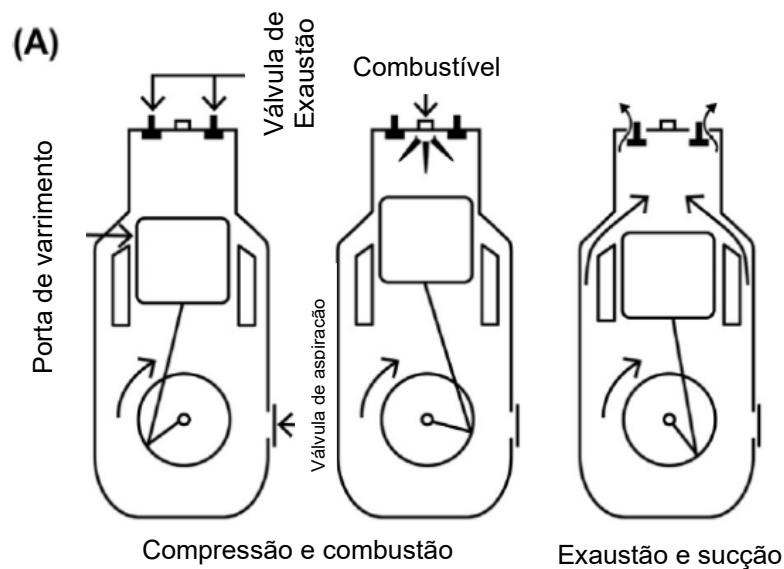


Figura 3 - Etapas do funcionamento de um motor a 2 tempos (Adaptado Okubo & Kuwahara, 2020).

Neste tipo de motor, a combustão acontece a cada rotação da roda.

- A) **Compressão e combustão (Primeiro processo)**: Quando o pistão sobe gradualmente a partir do limite inferior do cilindro, o ar é aspirado através da válvula de admissão. Seguidamente, esta válvula é fechada e o pistão comprime o ar até ao momento em que o combustível é injetado havendo assim a ignição e a queima do mesmo, terminando desta forma o primeiro tempo.

B) **Escape e sucção (Segundo Processo):** A combustão faz com que o pistão desça e com que a válvula de admissão seja fechada. Por sua vez a porta de varrimento fica aberta de modo a expulsar os gases de combustão pelas válvulas de escape (Okubo & Kuwahara, 2020).

Comparando os dois tipos de motor, ambos possuem diversas vantagens e desvantagens. O motor a quatro tempos tem como principais vantagens a menor perda de combustível e a maior eficiência térmica. A limpeza do cilindro por sua vez também é mais viável e o tempo de vida é superior. Contudo, devido à complexa estrutura é necessária uma roda maior e quando comparado a um motor de dois tempos com o mesmo volume, o motor de dois tempos possui uma potência ligeiramente superior (Okubo & Kuwahara, 2020).

Quanto ao motor de dois cilindros este tem como vantagens, para além das mencionadas anteriormente, a fácil construção, manuseamento, uma roda mais pequena e com uma rotação mais suave. Contudo, neste tipo de motores o escape tende a não ser o suficiente, sendo necessário utilizar um *blower* de alta pressão, de forma a realizar a limpeza da câmara de combustão (Okubo & Kuwahara, 2020).

Desta forma, os motores a quatro tempos são geralmente de pequena ou média dimensão e de altas velocidades para geração de energia, ao contrário dos motores a dois tempos que são de grandes dimensões e utilizados para a propulsão do navio (Okubo & Kuwahara, 2020).

2.1.2. Classificação pelas velocidades

Os motores podem também ser classificados tendo em conta a velocidade de rotação, sendo esta medida em rotações por minuto (rpm). Esta classificação é importante a nível do controlo de qualidade do ar pois os fatores de emissão de NO_x são definidos, segundo a legislação, através da regulamentação do navio (Tier I, II ou III) e pela velocidade de rotação dos motores. Estes são então classificados em motores de alta, média e baixa velocidade (Fontelle *et al.*, 2023).

Embora que seja difícil definir-se a gama de rotações a qual classifica cada tipo de motor, apresenta-se na Tabela 1 os dados gerais para cada uma das classificações mencionadas anteriormente (Okubo & Kuwahara, 2020).

Tabela 1 - Classificação dos motores dos navios quanto à velocidade de rotação.

Tipo de motor	Velocidade operacional	Ciclo	Combustível	Características
Baixa velocidade	<300 rpm	Dois tempos	HFO	Potências elevadas (Acima de 4000 kW/cilindro) Realizam a propulsão principal
Velocidade média	300 a 900 rpm	Quatro tempos	MGO, MDO, HFO	Potência entre 100 a 2000kW/cilindro Realizam a propulsão principal e auxiliar Tipo de motor mais utilizado na construção de navios de cruzeiro
Alta velocidade	>900 rpm		MGO, MDO	Geralmente utilizados em pequenas embarcações ou como fontes de energia auxiliar a bordo do navio.

HFO – *Heavy Fuel Oil*; MDO – *Marine Diesel Oil*; MGO – *Marine Gasoil*

Existem ainda mais dois tipos de motor, sendo estes:

- turbinas a vapor: atualmente pouco usadas, pois foram substituídas pelos motores diesel, os quais são mais eficientes e menos dispendiosos;
- turbinas a gás: embora este tipo de motor seja mais utilizado em navios de guerra, estão atualmente instalados apenas numa pequena proporção da frota mercante, muitas vezes em conjunto com motores a diesel (Fontelle *et al.*, 2023).

A principal vantagem de um motor a diesel trata-se dos custos de operação do mesmo. Este tipo de motor não necessita de possuir ignição elétrica, possui melhores consumos de combustível e de óleo lubrificante para funcionar. O motor a diesel só necessita que o ar seja comprimido e, portanto, a pressão de compressão pode ser aumentada. Como a eficiência térmica do motor de combustão interna aumenta à medida que as pressões de compressão aumentam, o motor diesel tem a maior eficiência térmica entre todos os outros motores térmicos. Como a pressão e a temperatura de compressão são altas, o combustível pesado de baixa qualidade pode ser utilizado (Okubo & Kuwahara, 2020).

Mesmo assim, o motor a diesel apresenta algumas desvantagens, como o facto de a pressão da queima ser alta e apenas poderem ser utilizados materiais de alta qualidade no fabrico das peças, resultando por sua vez com que o peso total do motor aumente. Por outro lado, o combustível deve ser injetado a alta pressão pelo que o injetor de combustível se trata de um elemento complexo e difícil de manusear (Okubo & Kuwahara, 2020).

Os navios de cruzeiro utilizam geralmente motores de média velocidade mais pequenos, devido ao espaço limitado a bordo (Guarasa *et al.*, 2017).

2.1.3. Consumo de combustível

No transporte marítimo a maior parte da energia consumida é utilizada para propulsão, da qual uma pequena fração é usada para manobras em portos onde os navios costumam operar por menores períodos e a baixa velocidade (OECD, 2011).

Segundo o relatório “2023 Marine Bunker Fuels Review”, publicado pela *Veritas Petroleum Services* (VPS), o tipo de combustível mais consumido pela indústria naval em 2023 foi o *Very Low Sulphur Fuel Oil* (VLSFO) representando 54,3% do combustível consumidos pelos navios, seguido do HFO representando este cerca de 29,5%. Por fim, o MGO representou apenas 14,2% do combustível consumido (VPS, 2024).

Constatou-se através de um estudo realizado pela *International Maritime Organization* (IMO), um aumento do consumo de combustíveis alternativos, como *Liquid Natural Gas* (LNG), *Liquid Petroleum Gas* (LPG), metanol, hidrogénio e amónia. Na Figura 4 encontram-se representados os combustíveis alternativos que mais são consumidos e na Figura 5 quantos navios de momento consomem cada tipo de combustível alternativo.

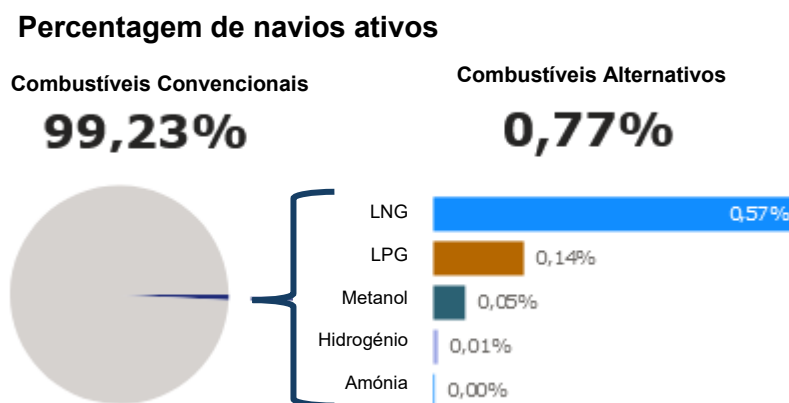


Figura 4 – Consumo de combustíveis convencionais e alternativos pelos navios (Adaptado de IMO, 2024a).

Número de navios por tipo de combustível

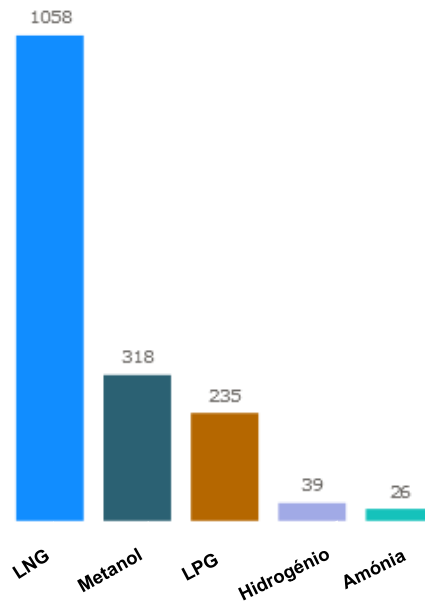


Figura 5 - Número de navios a nível mundial que utilizam combustíveis alternativos e o combustível que utilizam (Adaptado de Adams, 2013 e Fontelle *et al.*, 2023).

O combustível alternativo mais consumido foi o LNG, havendo de momento 1 058 navios a optarem por este combustível como o seu principal. Contudo, segundo a Figura 6, a indústria de navios de cruzeiros é das áreas do transporte marítimo onde menos combustível é consumido (IMO, 2022).

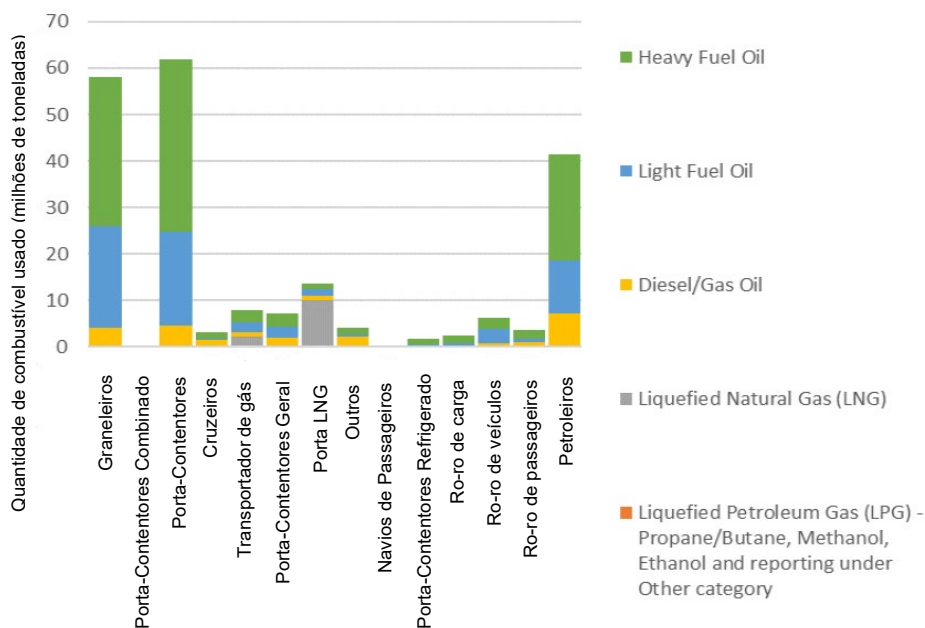


Figura 6 - Utilização de cada tipo de combustível em cada tipo de navio (Adaptado de IMO, 2022).

Os consumos de um navio estão relacionados diretamente com as características do mesmo, as quais são as condições de funcionamento do motor, forma do casco, condições de carga, rugosidade do casco, condição do motor, dimensão e velocidade do navio (Mersin *et al.*, 2017; Miola *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2015).

Para além destes fatores, a manutenção regular dos motores principais e a experiência da equipa de operadores da sala das máquinas também afetam o consumo de combustível. Existem, no entanto, variáveis relacionadas com este aspeto que não podem ser controladas tais como as condições meteorológicas e marítimas. As emissões dos navios são fortemente dependentes do consumo de combustível, do tipo de combustível e da velocidade. Genericamente devem ser considerados os seguintes modos operacionais, como demonstrado na Figura 7 (Corbett & Koehler, 2003; Mersin *et al.*, 2017; Yau *et al.*, 2012; Zis, 2019).

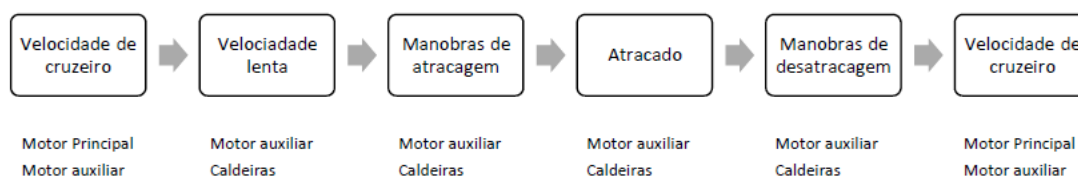


Figura 7 - Etapas na atracação e saída de navios de porto (Adaptado de Zis, 2019).

Num estudo realizado por Chang *et al.*, (2014) foi analisado o consumo de combustível de navios que chegaram ao Porto de Incheon, na Coreia do Sul, entre janeiro e outubro de 2012. A estimativa do consumo de combustível teve em conta as diferentes características das embarcações, como a potência dos motores principal e auxiliar, a velocidade de operação e a distância de navegação, em todos os segmentos de movimentos da embarcação no porto. Os resultados deste estudo demonstraram que:

- Cada embarcação consome uma quantidade diferente de combustível;
- Os Ro-ro foram os navios que mais consumiram, seguidos pelos porta-contentores.

Adicionalmente, o mesmo estudo destaca que no Porto de Incheon, as manobras perto do porto são as operações que mais contribuem para o consumo de combustível independentemente do tipo de navio, o que se traduz num maior número de emissões nas zonas costeiras e, conseqüentemente, um maior impacto no ambiente e na saúde da população das zonas junto dos portos. Tendo em conta os diferentes fatores mencionados é difícil estimar o consumo de combustível bem como as emissões (Chang *et al.*, 2014).

2.2. Combustíveis Tradicionais

Na indústria naval são utilizados três tipos de combustíveis específicos com certas características que irão influenciar diretamente as emissões dos navios. Estes combustíveis podem ser compostos por frações de resíduos, frações de destilados ou uma mistura de ambos, provindos da destilação do crude (Alfa Laval, 2018).

Assim, os principais combustíveis são os seguintes:

O Heavy Fuel Oil (HFO) é um combustível conhecido por ter uma densidade e viscosidade bastante elevada, cerca de 900 kg/m³ a 15 °C e 180 mm²/s a 50 °C, respetivamente. São constituídos por moléculas de hidrocarbonetos de longa cadeia e compostos aromáticos com cadeias laterais bastante longas. É considerado o combustível mais poluente, pois possui percentagens de enxofre acima de 3,5% (Oiltanking, 2023; Alfa Laval, 2018).

O Marine Gasoil (MGO) é um combustível composto exclusivamente por frações de destilado. Tem uma viscosidade menor do que o HFO e uma menor percentagem de enxofre. A concentração máxima permitida para que este tenha esta designação é 1,5% em enxofre. Este tipo de combustível é comercializado com diferentes concentrações de enxofre, como por exemplo o *Low Sulfur Marine Gasoil* (LS-MGO) com menos de 0,1% de enxofre na sua composição, sendo este o combustível mais utilizado em zonas *Emission Control Areas* (ECA) (Oiltanking, 2024).

O Marine Diesel Oil (MDO) é um combustível caracterizado por ser uma mistura entre frações de destilado e frações de resíduo. Este pode ser classificado como um combustível com baixo teor de enxofre ou com uma composição intermédia entre o MGO e HFO, sendo este último denominado por *Intermediate Fuel Oil* (IFO) (Oiltanking, 2023). Caso o MDO possua porções até 40% de HFO e mantenha no máximo até 0,5% de enxofre, pode ser então classificado como um VLSFO. Caso ultrapasse esta quantidade, passa a ser um IFO possuindo no máximo até 3,5% de enxofre na sua composição (Alfa Laval, 2018).

2.3. Combustíveis Alternativos

Por melhor qualidade que os combustíveis tradicionais tenham, estes continuam a ser combustíveis fósseis, fazendo com que a queima dos mesmos produza grandes

quantidades de GEE e poluentes perigosos para o ambiente e saúde humana. Por estes motivos existe a necessidade de procurar novas soluções que diminuam a degradação provocada por estes combustíveis. Seguidamente são apresentados alguns dos novos combustíveis com potencial para serem utilizados futuramente na indústria naval.

O *Liquefied Natural Gas (LNG)* é um combustível composto principalmente por metano e etano, podendo conter também propano e butano. O LNG trata-se de um combustível que não é tóxico nem corrosivo, e que devido ao seu preço é bastante competitivo. Uma das suas grandes vantagens é que pode ser transportado por longas distâncias. Contudo, o LNG necessita praticamente de quatro vezes mais espaço de armazenamento quando comparado com o MGO, devido a todos os equipamentos necessários para que este seja seguro de se utilizar. O LNG necessita de estar armazenado em tanques criogénicos pelo que, dependendo das condições exteriores, o combustível pode reevaporar. A utilização do LNG está por sua vez associada a riscos de incêndio e explosão. Nos últimos anos, o fornecimento de LNG como combustível para navios tem crescido bastante devido aos benefícios, tanto a nível ambiental como a nível económico. O uso de LNG como combustível naval permite reduzir as emissões de NO_x em cerca de 80% e praticamente eliminar as emissões de SO₂ e partículas. Contudo, devido à não combustão do metano nos motores de baixa e média velocidade, estima-se que este não irá resultar em nenhum benefício a nível dos GEE num espaço de 20 anos havendo apenas a melhoria em motores de alta velocidade. Embora o preço competitivo do LNG, os custos de investimento para que um navio possa navegar com este combustível são bastante mais elevados em comparação com os sistemas convencionais (Bilgili, 2023).

O *Liquefied Petroleum Gas (LPG)* trata-se de uma mistura de hidrocarbonetos leves, sendo os principais gases que o compõe o butano e o propano, sendo este resultante da destilação do petróleo. Este pode ainda ser utilizado com os mesmos equipamentos que navios a LNG utilizam. O LPG possui uma elevada densidade energética e é um combustível relativamente mais limpo em relação a outros produtos petrolíferos. Devido ao seu elevado número de octanas e baixo número de cetonas, torna-se uma boa alternativa para os motores Otto. Em termos de distribuição, o LPG é relativamente mais vantajoso que o LNG devido a uma maior disponibilidade de depósitos ao redor do mundo. Contudo, este combustível apresenta alguns problemas, tais como (Bilgili, 2023):

- ser menos competitivo comparado com outros combustíveis alternativos;

- com pouco desenvolvimento tecnológico;
- limitações de mercado.

Para além disso, o LPG é mais denso do que o ar, fazendo com que seja difícil de detetar fugas, e devido ao seu baixo *flash point*, torna-o um combustível perigoso. Para que seja possível operar um navio a LPG é necessária uma tripulação especializada em caso de existência de uma fuga. A nível ambiental, o LPG não é tóxico, não produz PM nem SO_x, produz baixas quantidade de CO₂ e diminui substancialmente as emissões de NO_x. Em comparação com o HFO, o LPG durante todo o seu ciclo de vida, produz menores quantidades de GEE e CO (Bilgili, 2023).

O hidrogénio (H₂) trata-se da substância mais abundante do universo e pode ser obtido a partir, por exemplo, da eletrólise da água, sendo a fonte de maior abundância o gás natural. Este pode possuir várias denominações dependendo da sua origem. O hidrogénio é denominado de “Hidrogénio Cinzento/Castanho/Preto” quando é derivado de combustíveis fósseis, havendo a produção de CO₂, “Hidrogénio Turquesa” quando é produzido através da pirólise de combustíveis fósseis, “Hidrogénio Verde” quando é produzido a partir da eletrólise utilizando fontes renováveis de energia e “Hidrogénio Amarelo/Roxo” quando é produzido a partir da eletrólise utilizando energia nuclear. O hidrogénio apresenta alguns problemas, especialmente a nível do armazenamento e manuseamento. O uso deste combustível está associado a um risco elevado de fugas devido à sua elevada difusidade, podendo causar vários problemas operacionais, sendo que passa ao estado líquido com pressões superiores a 700 bar e -253 °C. É altamente inflamável e possui uma densidade energética baixa, sendo assim necessárias maiores quantidades de combustível para proporcionar a energia necessária para a navegação. Por outro lado, é um combustível que apenas possui emissões de água associadas, quando é produzido através de fontes de energia renováveis. Este combustível pode ser utilizado em conjunto com outros, como por exemplo amónia, contribuindo para a redução de NO_x (Bilgili, 2023).

A amónia (NH₃) pode ter origem de várias fontes sendo denominada por “Amónia Castanha/Cinzenta” quando é derivada de combustíveis fósseis, havendo a produção de CO₂, “Amónia Turquesa” quando esta é produzida através da pirólise

de combustíveis fosseis, “Amónia Verde” quando é produzida através de eletrólise com energia provinda de fontes renováveis e “Amónia Vermelha” quando é produzida através de eletrólise utilizando energia nuclear. Esta apresenta algumas vantagens como combustível naval sendo estes os seguintes (Bilgili, 2023):

- pode ser utilizada diretamente nos motores de combustão ou através de células de combustível alcalinas;
- existe facilidade no seu manuseamento, dado que se trata de um químico que já é habitualmente transportado nos portos de carga;
- as condições de transporte e manuseamento são semelhantes às do propano permitindo grandes armazenamentos da mesma;
- a nível energético, a amónia possui um número de octanas superior à gasolina e gás natural, podendo ser operada em rácios de compressão superiores;
- o calor latente da vaporização da amónia é alto garantindo que é atingida a temperatura máxima e que as perdas de calor são reduzidas;
- sendo também energeticamente mais eficiente que os combustíveis convencionais;
- elimina por completo as emissões de CO₂, CO, SO_x e hidrocarbonetos.

No entanto, a amónia possui certos problemas associados. Trata-se de um gás tóxico e corrosivo (este efeito pode ser reduzido quando transportada no estado líquido), caso haja uma fuga pode ser uma ameaça para a vida marinha dos habitats como dos humanos e atmosfera, dado que esta possui uma densidade menor que o ar. O uso de amónia pode eliminar a emissão de vários poluentes, contudo aumenta as emissões de NO_x, por conter na sua constituição maiores quantidade de nitrogénio. Por outro lado, caso se misture a amónia com combustíveis convencionais, é possível eliminar até 80% das emissões deste poluente (Bilgili, 2023).

2.4. Estratégias para a redução de emissões

Como referido anteriormente existe a necessidade de reduzir as emissões efetuadas pelos navios de modo que a indústria de transporte marítimo se torne cada vez mais sustentável e menos impactante no ambiente.

Para tal têm sido cada vez mais adotadas medidas tanto em design de navios de baixas emissões como medidas legislativas de forma a alcançar-se estes objetivos. Seguidamente irão ser apresentadas algumas medidas e tecnologias adotadas.

2.4.1. *Scrubbers*

Os Sistema de Tratamento de Gases de Combustão ou EGCS (*Exhaust Gas Cleaning System*), quando instalados em navios são denominados de *scrubbers*. Estes são equipamentos instalados no sistema de escape, logo a seguir ao motor. Estes têm como função o tratamento dos gases de combustão provindos dos motores, utilizando uma variedade de substâncias que podem incluir água do mar, água doce tratada quimicamente ou substâncias secas (ABS, 2018).

A remoção dos gases de escape é efetuada pela sua dissolução e/ou reação com o fluido de lavagem ou absorção no enchimento (Lange *et al.*, 2015).

Os *scrubbers* tem como principal objetivo a remoção de SO_x das emissões atmosféricas devido à elevada quantidade de enxofre que os combustíveis marítimos possuem, de forma a cumprir com as normas exigidas pela IMO. Além da remoção de SO_x, os *scrubbers* tem também a capacidade de remover NO_x e partículas (Zannis *et al.*, 2022).

Os *scrubbers* podem ser classificados tendo em conta o seu funcionamento, que pode ser tanto seco ou húmido. A grande parte dos *scrubbers* instalados a bordo nos dias de hoje são *scrubbers* húmidos, que por sua vez podem ser classificados tendo em conta o modo de operação dos mesmos. Estes modos de operação podem ser em *open loop*, *close loop* ou híbrido (ABS, 2018; Zannis *et al.*, 2022).

A composição do gás efluente do EGCS depende da qualidade do combustível utilizado, da eficiência da combustão, da qualidade da água utilizada para a lavagem, e da própria eficiência do *scrubber* (Lange *et al.*, 2015).

Scrubber Close Loop – Neste tipo de equipamento, os gases de combustão são direcionados para o *scrubber* onde circula água (geralmente a água do mar), contendo hidróxido de sódio (NaOH) que atua como agente neutralizador dos compostos ácidos dos gases de combustão. Os componentes solúveis na água (como é o caso dos SO_x e NO_x) são absorvidos pela água, lavando desta forma os gases. A água permanece em circulação no sistema, enquanto o pH é monitorizado. Por fim, esta água é enviada para o sistema de tratamento de águas do navio, de modo a ser tratada para ser descarregada em alto mar (Okubo & Kuwahara, 2020; Witherbys, 2018)

Scrubber Open Loop – Nos *scrubbers open loop* a água do mar é bombeada de forma que entre em contacto com os gases provindos do motor. Neste processo

os poluentes solúveis na água são absorvidos e descarregados nas águas oceânicas depois de se ter efetuado o controlo do pH (Okubo & Kuwahara, 2020; Witherbys, 2018).

Scrubber Híbrido – O *scrubber* híbrido funciona em ambos os modos mencionados anteriormente. No caso em alto mar, o *scrubber* é operado em *open loop* e quando se encontra em porto é operado em *close loop* (Okubo & Kuwahara, 2020).

Existem vantagens em utilizar sistemas do tipo *open loop*, como por exemplo, o facto de não ser necessário a utilização de um aditivo alcalino e a água de lavagem ser mais simples de tratar. No que se toca aos sistemas do tipo *closed loop*, o *scrubber* mantém a eficiência e há pouca ou nenhuma descarga de água, diminuindo o seu impacte ambiental e permitindo a sua utilização em locais onde não é possibilitada a navegação com sistemas *open loop* (ABS, 2018).

De modo a aproveitar as vantagens de ambos os sistemas, foram desenvolvidos, por alguns fabricantes os *scrubbers* híbridos, que permitem a operação tanto em sistema *open loop* como *closed loop*, consoante a sua necessidade (ABS, 2018).

A adoção de *scrubbers* demonstrou ser economicamente mais vantajosa do que a utilização de combustíveis com menor teor de enxofre, principalmente devido à diferença de preços entre os combustíveis de alto teor de enxofre e os de baixo teor de enxofre. Assim, a estratégia mais adotada pela indústria de transportes marítimos tem sido a instalação de *scrubbers*, tal como é representado na Figura 8 (Transport & Environment, 2023; Zhang & Stripple, 2019).

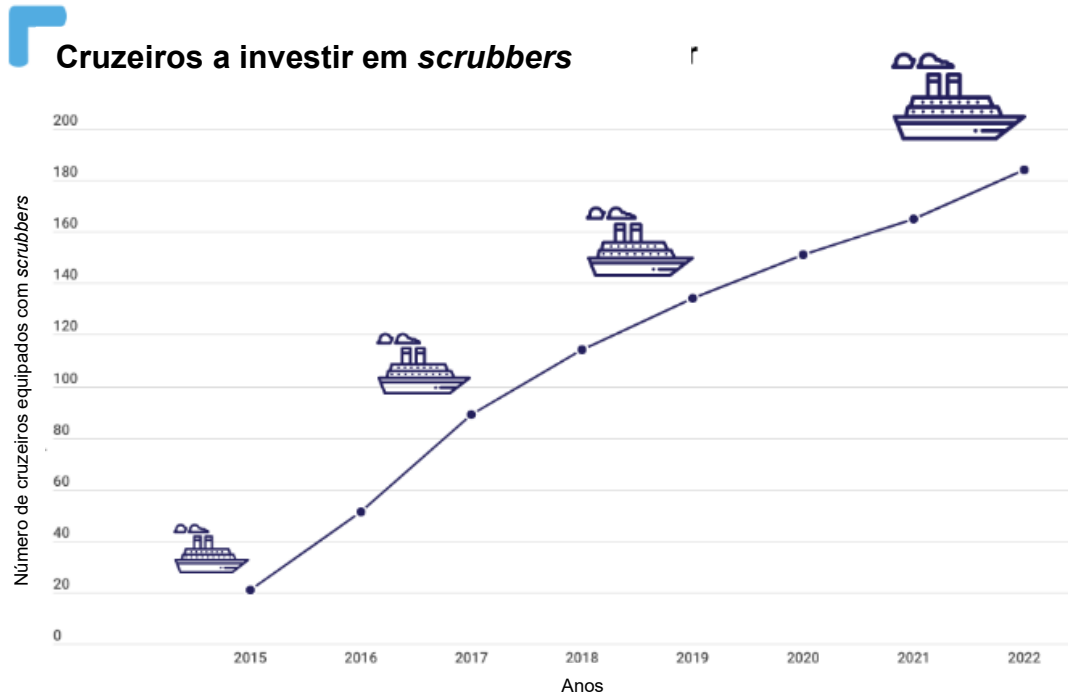


Figura 8 - Aumento da quantidade de navios que se encontram equipados com *scrubbers* (Adaptado de *Transport & Environment*, 2023).

2.4.2. Sistemas de propulsão alternativa

Um dos métodos mais promissores de propulsão alternativa trata-se da propulsão assistida por vento denominada por *Wind-assisted Propulsion System* (WAPS). Esta tecnologia utiliza o vento para ajudar na propulsão dos navios em alto mar e é expectável que se consiga reduzir até 30% das emissões efetuadas pelos navios (Soupeze, 2023).

Em termos energéticos, a energia proporcionada pelo vento é uma energia renovável e que não necessita de exaustão, permitindo que o navio navegue através de uma energia grátis, suplementando ou substituindo por completo a necessidade dos motores (Abs & Delft, 2023).

Algumas das tecnologias criadas neste âmbito são as seguintes:

Velas de rotor (*Rotor Sails*) – Este tipo de WAPS trata-se de rotores de *spinning*, dirigidos através de pequenos motores elétricos que são montados verticalmente no deck do navio. A rotação ativa dos rotores junto com o vento cria uma diferença de pressão no cilindro que promove a força de propulsão. Caso o navio navegue contra o vento, não é possível alcançar poupanças de combustível substanciais. Outro problema deste tipo de tecnologias trata-se da poluição sonora e as

vibrações causadas pela rotação dos rotores, que deve ser controlada (Abs & Delft, 2023). Esta tecnologia encontra-se representada na Figura 9.

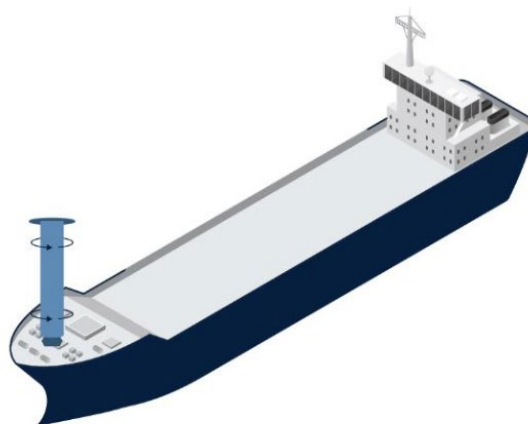


Figura 9 – Tecnologia de velas de rotor (Abs & Delft, 2023).

Velas Rígidas (*Hard Sails*) – O funcionamento desta tecnologia é bastante semelhante ao funcionamento dos barcos à vela tradicionais. O navio é empurrado através da força de arrastamento causada pelas interações entre as velas e o vento. Contudo, estas velas são rígidas e compostas por um material leve e forte, como por exemplo fibra de carbono. Geralmente as velas podem ser rodadas para se ajustarem à direção do vento e aumentarem a propulsão. Este tipo de velas adota um formato semelhante à de asa de avião criando uma força de propulsão exercida sobre o navio superior às velas tradicionais (Abs & Delft, 2023). Esta tecnologia encontra-se representada na Figura 10.

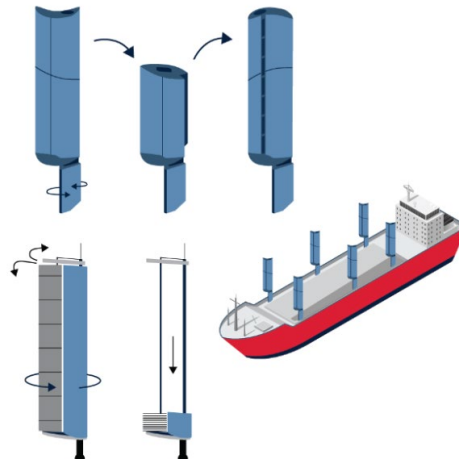


Figura 10 - Tecnologia de velas rígidas (Abs & Delft, 2023).

Asas de Sucção (Suction Wings) – Trata-se de estruturas com o formato de asas verticais que são montadas no deck do navio. Ao contrário das velas de rotor, estas rotacionam automaticamente de acordo com a direção do vento. Estas estruturas encontram-se equipadas com ventiladores que realizam a sucção do ar de forma a originar energia para a propulsão do navio (Abs & Delft, 2023). Esta tecnologia encontra-se representada na Figura 11.

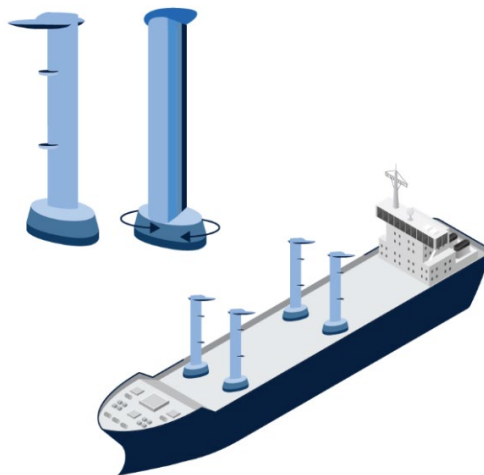


Figura 11 – Tecnologia de asas de sucção (Abs & Delft, 2023).

Velas (Kites) – Os *kites* são colocados na proa do navio de forma a ajudar a puxar o mesmo. Este precisa de ser lançado ou recolhido tendo em conta as condições atmosféricas. Ao contrário das tecnologias tratadas anteriormente os *kites* podem alcançar altitudes maiores, fazendo com que seja possível atingir ventos de maior

altitude. Existem dois tipos de *kites*, sendo estes os passivos e os dinâmicos, onde um segue a direção do vento enquanto o outro move-se de forma a alcançar velocidades mais rápidas (Abs & Delft, 2023). Esta tecnologia encontra-se representada na Figura 12.

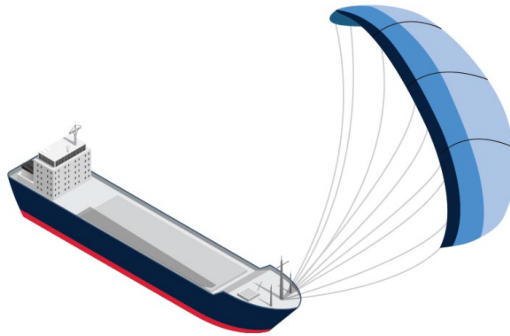


Figura 12 - Tecnologia de *kite* (Abs & Delft, 2023).

Um outro tipo de propulsão que se tem demonstrado bastante promissor é a propulsão nuclear tendo gerado bastante interesse nos últimos anos devido à densidade energética que este tipo de tecnologia é capaz de oferecer. Contudo, este tipo de propulsão gera bastantes preocupações, especialmente no que concerne ao reator nuclear, em caso de acidente (Soupezz, 2023).

Parte das preocupações originadas por este meio de propulsão concernem no design do navio de forma a garantir que em caso de acidente, a deformação do casco não afete o reator. O compartimento do reator deve ser desenhado para que o mesmo mantenha a sua integridade durante toda a vida do navio e tenha em consideração a segurança da tripulação e do material nuclear carregado a bordo em caso de incêndio (Soupezz, 2023).

2.4.3. Estratégias Operativas

A velocidade dos navios está diretamente relacionada com a quantidade de combustível consumido, e conseqüentemente com a quantidade de poluentes emitidos. Assim, a hipótese de redução da velocidade dos navios ao aproximarem-se de portos tem sido colocada como uma medida bastante eficiente para a redução da poluição marítima. Para que tal aconteça, os navios necessitam de reduzir a velocidade a uma certa distância das cidades portuárias (Wang & Li, 2023).

A redução da velocidade de 24 para 8 nós permite reduzir as emissões do navio até 48,4% na aproximação ao porto e 32,9% ao estar atracado, melhorando desta forma o nível da qualidade do ar em zonas portuárias. Ainda assim, a diminuição das emissões de poluentes resultante desta medida é baixa quando comparada com todo o trajeto que o navio percorre (Wang & Li, 2023).

Um outro sistema que tem originado bastante interesse são os sistemas de atracação automática. A atracação é a operação final do navio ao assegurar a imobilização do mesmo. Os sistemas de atracação automática (SAA) têm a capacidade de assegurar a atracação do navio sem o uso de cordas (Wang & Li, 2023).

Este tipo de sistema diminui o tempo de embarque ou desembarque de passageiros e o tempo que os motores auxiliares necessitam de trabalhar, levando a que haja uma redução na quantidade de emissões efetuadas. Permite uma diminuição de 25% do combustível necessário nesta operação e 76% da quantidade de emissões efetuadas pelo mesmo (Wang & Li, 2023).

2.5.5. Medidas portuárias

Enquanto atracados, os navios necessitam de ter os motores auxiliares ligados de forma a gerar energia elétrica essencial às atividades efetuadas a bordo. Esta necessidade leva a que os navios continuem a emitir poluentes mesmo que não estejam a navegar. A utilização da tecnologia *On-shore Power Supply* (OPS) permite não só reduzir as emissões do navio como também reduzir a poluição sonora efetuada pelos motores auxiliares (Wang & Li, 2023).

No entanto, as emissões dependem diretamente da fonte de energia que é utilizada. Caso a energia seja provinda do carvão as emissões de carbono irão ser superiores

comparado ao uso de combustível. Caso a energia seja originada por fontes renováveis, como eólica ou solar, a tecnologia OPS demonstra ser uma opção viável para a redução das emissões de carbono (Wang & Li, 2023).

Ainda assim é necessário haver um grande investimento por parte das autoridades portuárias e das empresas de transporte marítimo em termos de equipamento necessário para que haja a compatibilidade para o fornecimento energético (Wang & Li, 2023)

O Porto de Lisboa possui de momento um projeto para realizar a instalação de uma unidade OPS até 2029. É expectável que depois da implementação da rede de fornecimento energético, sejam reduzidas até 77% as emissões de GEE na área jurídica do Porto de Lisboa (APP, 2024) .

Na Figura 13 encontra-se representada o funcionamento de uma unidade OPS.

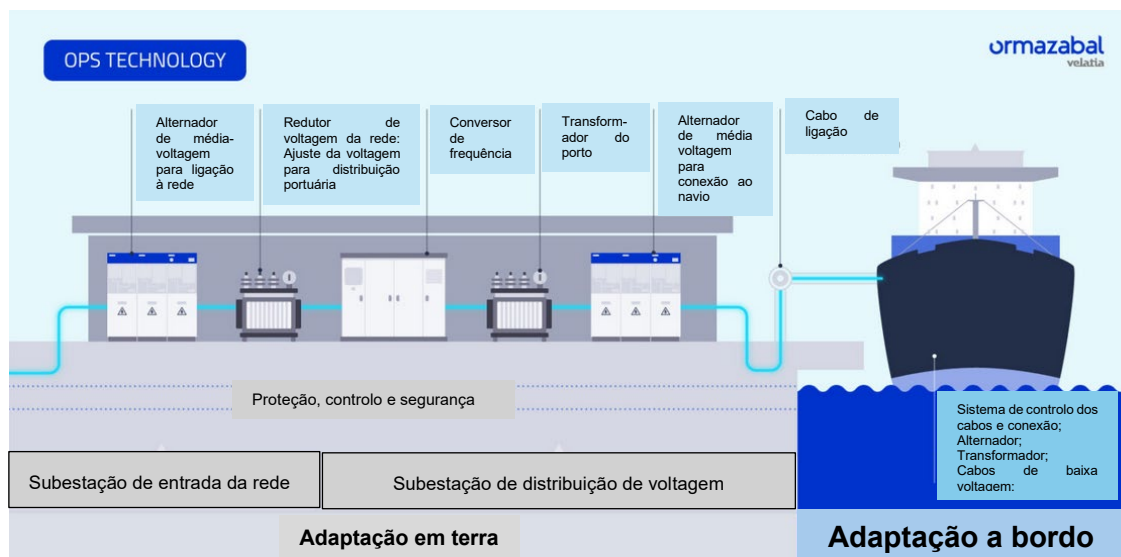


Figura 13 - Sistema de fornecimento de energia a navios *onshore* (Adaptado de Ormazabal, 2024).

Em termos de estratégias de mercado, pode-se utilizar incentivos económicos de forma a motivar as empresas de transporte marítimo a adotar medidas e designs que favoreçam a sustentabilidade da indústria (Wang & Li, 2023).

Uma das estratégias adotadas é a utilização de uma taxa diferenciada, onde se faz a redução de taxas portuárias de acordo com o desempenho ambiental da embarcação. De momento, esta medida é já aplicada num programa voluntário de quotas ambientais na Suécia desde 1998 (Wang & Li, 2023).

Uma outra estratégia é a utilização de um sistema de limite de comércio. Esta medida só pode ser adotada casos os governos ou outros órgãos reguladores definam um limite de degradação ambiental ou poluição permitida numa determinada área, permitindo às empresas que negociem licenças ou créditos de forma a cumprir com estes limites (Han, 2010).

Capítulo 3

Qualidade do ar e poluentes

3.1. Aspetos Ambientais

A poluição atmosférica exerce um impacto profundo na saúde pública, afetando negativamente tanto a produtividade humana como os sistemas naturais, com consequências graves ambientais e económicas. No entanto, os efeitos da má qualidade do ar são sobretudo evidentes em duas áreas principais: os grandes centros urbanos e os ecossistemas. Considerando que mais de metade da população mundial reside em centros urbanos, torna-se essencial melhorar e monitorizar a qualidade do ar, de modo a promover uma vida mais saudável nas cidades. (Büke *et al.*, 2016).

A poluição atmosférica refere-se à contaminação do ar, seja em ambientes exteriores ou interiores, por agentes químicos, físicos ou biológicos que alteram as características naturais da atmosfera. Esta poluição pode ser causada por equipamentos de combustão, tanto de uso doméstico, como fogões a combustão; quanto de uso exterior, veículos a combustíveis fósseis, indústrias e incêndios florestais (WHO, 2024a).

Quanto ao transporte marítimo, este também tem diversos impactos ambientais sendo estes divididos em três categorias (Figura 14) (Jägerbrand *et al.*, 2019):

- Emissões Atmosféricas,
- Contaminação das águas;
- Impactos Físicos.

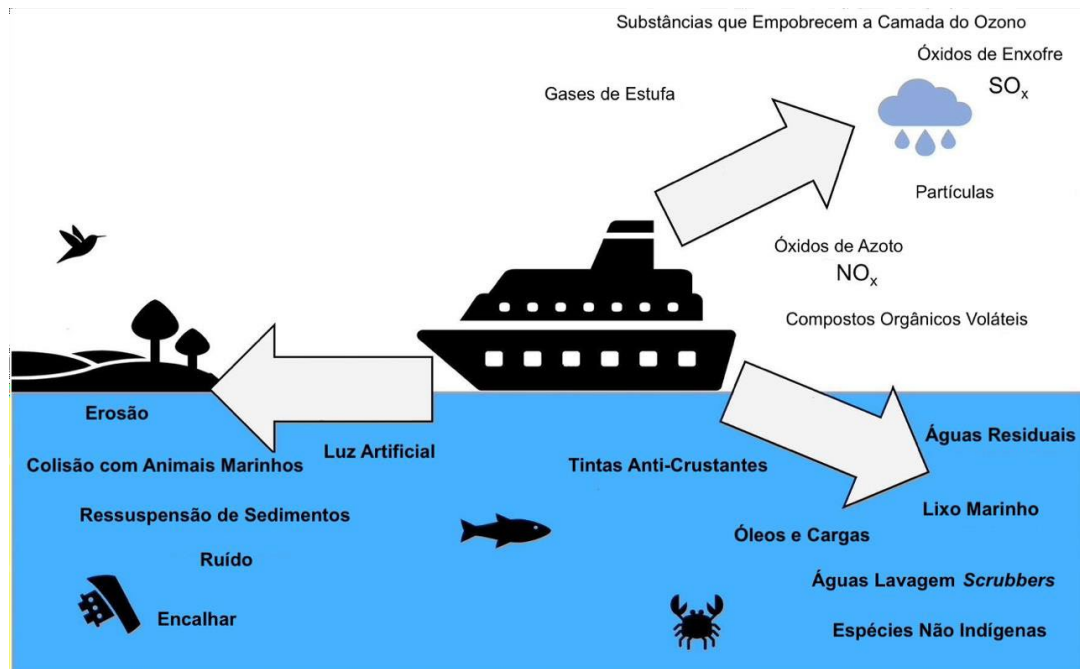


Figura 14 - Impactos da poluição originada por navios de cruzeiro (Adaptado de Jägerbrand *et al.*, 2019).

No contexto portuário, a poluição da água e do ar são os principais impactos ambientais. A contaminação das águas portuárias pode estar associada à descarga de águas de lastro, à utilização de tintas anti incrustantes, a derrames de óleo e à dragagem das vias navegáveis, para manter ou aumentar a profundidade dos canais, permitindo a receção de embarcações de maior porte. Já a poluição atmosférica nos portos pode ser causada pelas emissões de gases de combustão dos navios, camiões, equipamentos de movimentação de carga e linhas ferroviárias (Culliane & Talley, 2006).

3.2. Qualidade do ar

O ar é composto por um conjunto de gases que rodeiam o planeta Terra, próximos à superfície devido à força da gravidade. Esta mistura constitui a camada da atmosfera conhecida como troposfera. O ar é geralmente caracterizado como ar seco ao nível do mar, onde a pressão atmosférica é de 101,325 kPa a uma temperatura de 15 °C. A sua composição média é aproximadamente 78,08% de azoto (N_2), 20,95% de oxigénio (O_2), 0,93% de árgon (Ar) e 0,0314% de dióxido de carbono (CO_2). No entanto, o ar geralmente contém humidade, que pode manifestar-se sob a forma de vapor de água, gotículas líquidas ou cristais de gelo (Boubel *et al.*, 1994; Tan, 2014).

Atualmente não existe ar puro, mesmo nos locais mais remotos do planeta (polos, oceanos, desertos e montanhas) contendo sempre vestígios de poluentes, sejam eles gasosos, líquidos ou sólidos (Boubel *et al.*, 1994).

Na generalidade, a poluição atmosférica pode ser caracterizada como a acumulação de compostos prejudiciais à saúde humana e/ou ao ambiente, que comprometem a qualidade do ar. Esta é influenciada por diversos fatores, incluindo as fontes de emissão de poluentes e os seus meios de transporte, as transformações físico-químicas e as condições meteorológicas (Lichtfouse, Schwarzbauer, 2020).

No que diz respeito às fontes emissoras de poluentes, estas podem ser classificadas como antropogénicas (originadas por atividades humanas) ou biogénicas (de origens naturais). As fontes de emissão também podem ser categorizadas como fontes primárias, nas quais os poluentes são diretamente emitidos para a atmosfera, e fontes secundárias, onde os poluentes resultam de transformações de poluentes primários (Lichtfouse & Schwarzbauer, 2020).

Quanto ao transporte dos poluentes, este ocorre por meio de dois mecanismos principais: o transporte pelo vento, no qual os poluentes se deslocam ao longo do tempo através do processo de advecção, e o mecanismo de dispersão, onde o transporte dos poluentes se dá por meio da turbulência atmosférica (Lichtfouse & Schwarzbauer, 2020).

Quando emitidos para a atmosfera, os poluentes podem sofrer transformações físico-químicas, sendo as mais relevantes aquelas que promovem a formação de ozono, aerossóis e a deposição de componentes ácidos. Estas transformações podem ocorrer por meio de reações fotoquímicas e/ou reações térmicas (Lichtfouse & Schwarzbauer, 2020).

As condições meteorológicas são um dos fatores mais importantes quando se trata de qualidade do ar, uma vez que influenciam todos os fatores mencionados anteriormente. Elementos como a direção do vento, humidade, temperatura, pressão atmosférica, radiação e nebulosidade desempenham um papel crucial no estudo da qualidade do ar, pois afetam ou controlam significativamente as emissões, os gases presentes na atmosfera e a formação de aerossóis. Estes fatores influenciam o transporte dos poluentes, a turbulência e os fenómenos de convecção. Além disso, podem promover a formação de outros poluentes, pois as reações químicas atmosféricas são especialmente afetadas pela humidade relativa, radiação e temperatura (Lichtfouse & Schwarzbauer, 2020).

Os poluentes podem estar presentes na atmosfera em todos os estados físicos (sólido, líquido e gasoso). A definição de poluição atmosférica ou de poluentes atmosféricos não depende do tempo, do espaço ou de um conjunto específico de circunstâncias, uma vez que, independentemente da fonte — seja ela natural ou antropogénica —, os poluentes causam os mesmos efeitos adversos. Por isso, é essencial definir parâmetros de qualidade do ar, associados aos danos que estes poluentes podem causar à saúde humana, aos ecossistemas e às infraestruturas. Além disso, é fundamental proceder à monitorização e avaliação contínua da qualidade do ar (Vallero, 2019).

As emissões provenientes dos navios de cruzeiro têm um impacto significativo na qualidade do ar, afetando todo o ecossistema urbano e marinho (Moreno-Gutiérrez *et al.*, 2019).

No que se toca aos impactos dos poluentes na saúde humana, estes encontram-se representados na Figura 15.

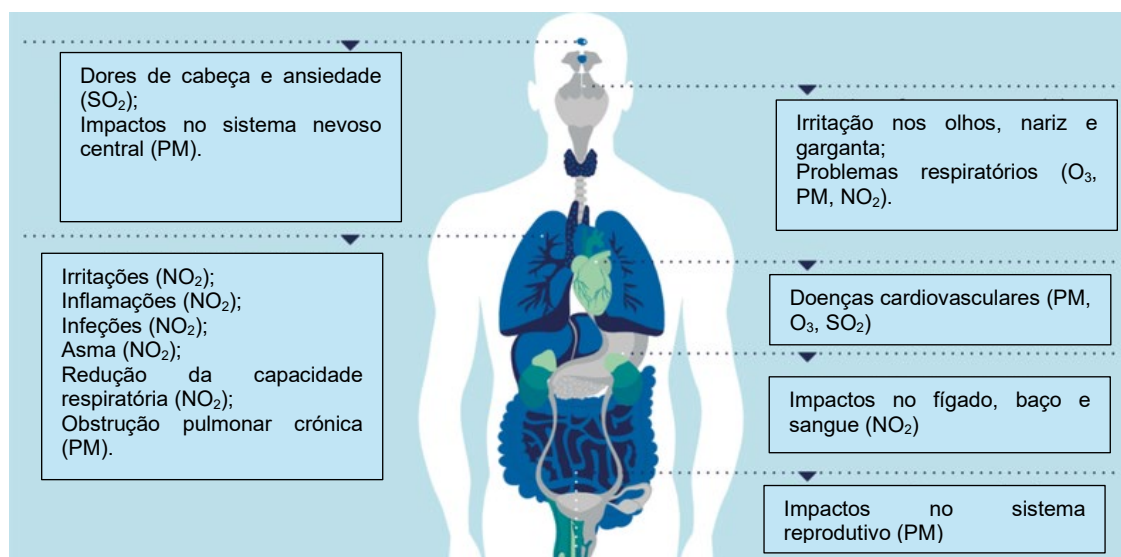


Figura 15 - Impactos dos poluentes emitidos pelos navios na saúde humana (Adaptado de EEA, 2023).

Estima-se que o transporte marítimo emita 1 056 biliões de toneladas de CO_2 por ano, o que corresponde a aproximadamente 2,9% do total das emissões de GEE. Além disso, os navios são responsáveis pela emissão de 4,7 a 6,5 toneladas de SO_x e de 5 a 6,9 toneladas de NO_x , valores que representam cerca de 13% e 15% das emissões anuais destes poluentes, respetivamente (Shu *et al.*, 2023).

Dependendo da cilindrada dos motores com que o navio está equipado, este pode emitir até 500 vezes mais compostos de enxofre do que um automóvel comum. Além disso, os poluentes podem ser transportados até 400 km em terra a partir da fonte emissora, dependendo das condições meteorológicas (Moreno-Gutiérrez *et al.*, 2019).

Em resposta às preocupações com os efeitos da poluição atmosférica, ao longo dos anos foram implementadas diversas medidas e políticas com o intuito de reduzir gradualmente as emissões de poluentes. Conforme indicado na Figura 16, verifica-se uma queda acentuada na poluição gerada pelos meios de transporte na Europa (European Environment Agency, 2023).

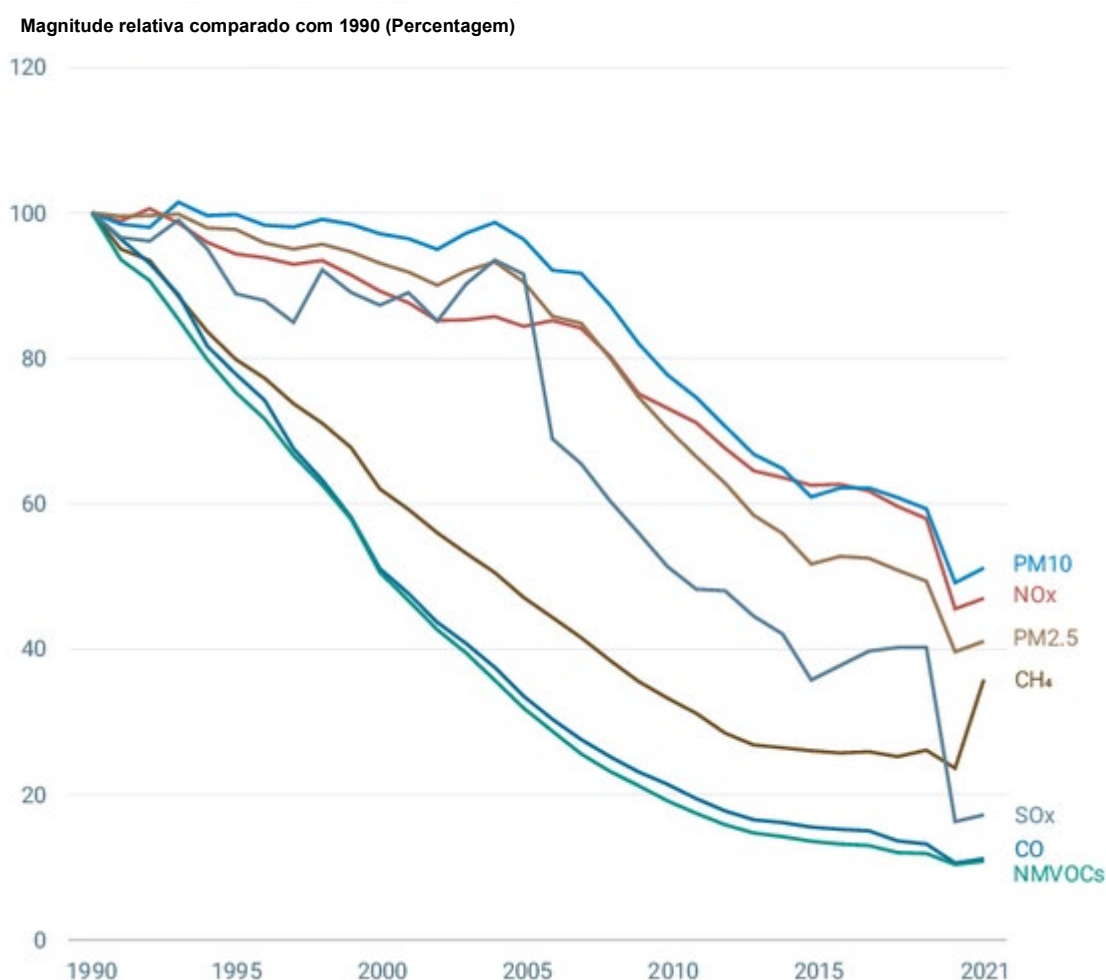


Figura 16 - Evolução da magnitude relativa aos poluentes emitidos por transportes, de 1990 a 2021 (Adaptado de European Environment Agency, 2023).

Através da Figura 16 é possível observar uma diminuição significativa das magnitudes relativas às emissões dos vários poluentes representados, destacando-se a redução de (European Environment Agency, 2023):

- 53% das emissões de NO_x;
- 83% das emissões de SO_x;
- 89% das emissões de CO;
- 64% das emissões de CH₄;
- 89% das emissões de Compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM);
- 47% e 56 das emissões de PM₁₀ e PM_{2,5}, respetivamente.

Por outro lado, ao analisar a contribuição dos vários tipos de transporte a nível europeu, verifica-se que o transporte marítimo internacional apresentou melhorias substanciais apenas nas emissões de SO_x, PM₁₀ e PM_{2,5}. Em relação aos restantes poluentes mencionados anteriormente, estes mantiveram ou pioraram os valores de emissões comparativamente aos registados no ano de 1990, como se verifica na Figura 17 (European Environment Agency, 2023).

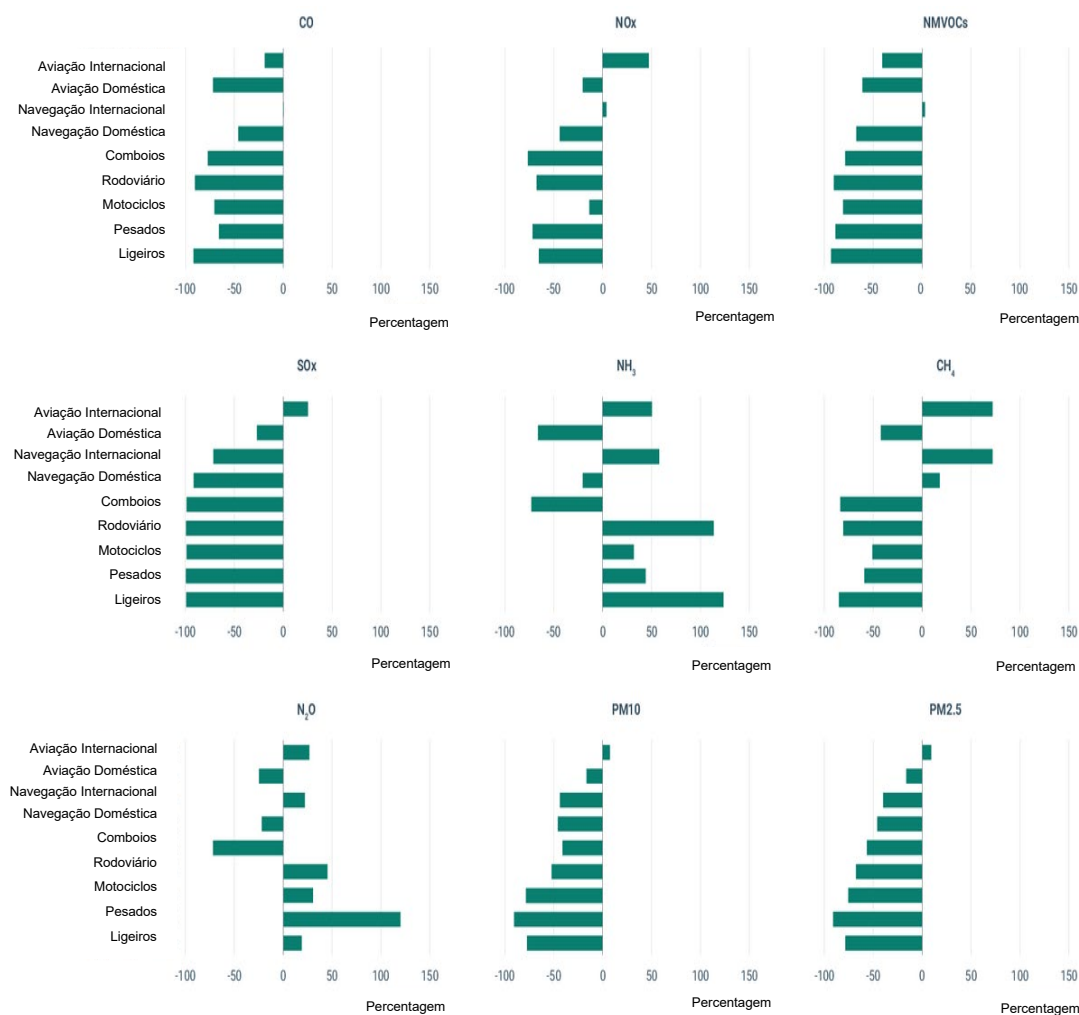


Figura 17 – Melhorias dos diversos meios de transportes europeus a nível das emissões entre 1990 e 2021 (Adaptado de European Environment Agency, 2023).

Comparativamente com a maioria dos portos europeus, em termos percentuais as emissões de SO_x, NO_x e PM₁₀ provenientes do transporte marítimo em Portugal revelaram-se significativamente superiores (European Environment Agency, 2023). A contribuição do setor marítimo para a concentração total destes poluentes atmosféricos na Europa e em Portugal encontra-se representada na Figura 18.

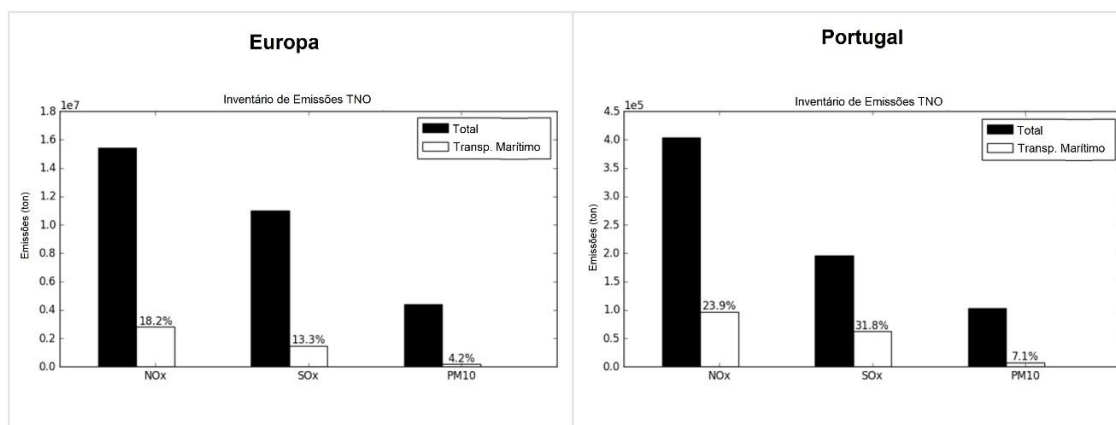


Figura 18 - Contribuição das emissões de NO_x, SO_x e PM₁₀ efetuadas por navios na Europa e em Portugal (Monteiro *et al.*, 2018).

A diferença observada entre Portugal e o resto da Europa pode ser explicada pela extensão da costa marítima do país e à importância que o transporte marítimo tem a nível económico. Além disso, há uma maior presença de áreas de controlo de emissões nos países do norte da Europa (Monteiro *et al.*, 2018).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), 99% da população mundial respira ar que excede os limites de poluição definidos nos seus próprios *Guidelines*, sendo os países menos desenvolvidos os mais afetados. Em resultado da má qualidade do ar, por ano, cerca de 7 milhões de pessoas sofrem de morte prematura, sendo do interesse mundial a criação de políticas e investimentos que promovam o uso de terras de forma mais sustentável, uma energia de uso doméstico e de transporte mais limpa e eficiente e uma melhor gestão de resíduos, como formas de diminuir a poluição atmosférica (WHO, 2024a).

3.3. Poluentes e seus Impactos

Como referido anteriormente, os poluentes são compostos que têm um impacto negativo na saúde humana e em todo o seu envolvente, colocando em causa a propensão e a sustentabilidade dos vários ecossistemas existentes. Desta forma, é necessário realizar o controlo da qualidade do ar de forma a mitigar este impacto. Os poluentes podem diferenciar-se entre partículas (PM₁₀ e PM_{2,5}), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos nitrosos (NO_x), monóxidos de carbono (CO) e ozono (O₃) (WHO, 2024b).

3.3.1. PM₁₀ e PM_{2,5}

O material particular pode ser definido como uma mistura suspensa no ar, de compostos sólidos e/ou líquidos, que variam em número, tamanho, forma, área de superfície, composição química, solubilidade e origem (Pope & Dockery, 2006).

Os poluentes que mais se destacam no material particular são as PM₁₀ e PM_{2,5} sendo estas partículas com um diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm e 2,5 µm, respetivamente. São caracterizadas por serem irrespiráveis e compostas por sulfatos, nitratos, amónia, cloreto de sódio, carbono negro, resíduos minerais ou água (WHO, 2024b).

Estas podem ser formadas por fontes de poluição primárias antropogénicas (queima de combustíveis fósseis ou queima de madeira) e biogénicas (tempestades de poeiras e fogos florestais). A formação destes poluentes também está associada a fontes de poluição secundárias, onde as partículas são obtidas através da conversão de certos precursores como NO_x, SO_x e compostos orgânicos voláteis (Al-Delaimy *et al.*, 2020).

As partículas tornaram-se um dos poluentes mais perigosos para a saúde pública mundial. Estas têm a capacidade de penetrarem profundamente nos pulmões e entrar na corrente sanguínea, podendo causar problemas cardiovasculares, cerebrovasculares e respiratórios. A diminuição do funcionamento pulmonar, cancro do pulmão, enfisema pulmonar, bronquite e asma são alguns dos problemas associados e que aumentam a mortalidade relacionada com as partículas. A gravidade das doenças associadas à inalação destes poluentes está diretamente relacionada à sua dimensão. Isto deve-se ao facto de que quanto menor é o diâmetro aerodinâmico das partículas inaladas maior a profundidade que estas podem penetrar nos pulmões (Al-Delaimy *et al.*, 2020; Corbett *et al.*, 2007; Pope & Dockery, 2006; Tan, 2014; WHO, 2024b).

Condições de baixa visibilidade é uma consequência direta da má qualidade do ar, pois esta geralmente é provocada pela dispersão e absorção de luz por parte de certos poluentes. As partículas é um dos responsáveis por provocar estas más condições de visibilidade, especialmente quando combinadas com outros compostos como SO_x ou NO_x (Tan, 2014).

As partículas emitidas pelos navios podem ser originadas pelo enxofre, carbono negro (CN), compostos orgânicos voláteis (COV), hidrocarbonetos, entre outros. Um dos tipos mais comuns de partículas é o carbono negro. Este composto é principalmente originado

devido a processos de combustão incompletos e é considerado o segundo poluente que mais contribui para as alterações climáticas, a seguir ao dióxido de carbono (CO_2). O carbono negro possui ainda o efeito de promover tanto o aquecimento como o arrefecimento do planeta, dependendo do tipo de interações que este tem com outros poluentes (Tiwary & Williams, 2019; Vallero, 2019).

3.3.2. Óxidos de enxofre

Um dos objetos mais legislados internacionalmente na indústria naval é a quantidade de enxofre presente nos combustíveis, dado que este composto dá origem aos óxidos de enxofre, sendo o HFO aquele que apresenta o maior teor na sua composição (Transport & Environment, 2023; Zannis *et al.*, 2022).

Os óxidos de enxofre (SO_x) são derivados da queima de combustíveis fósseis que contêm enxofre e tornaram-se um dos principais poluentes atmosféricos em diversos locais do planeta. A terminologia SO_x , é usada para representar dois compostos principais, sendo estes o SO_2 e SO_3 . Estes compostos são instáveis e raramente encontrados na natureza. Trata-se de um poluente resultante de fontes de emissão primárias antropogénicas, nomeadamente a queima de combustíveis fósseis, sendo estes gases incolores. É um poluente também responsável pela formação de partículas, compostos sulfurosos e ácido sulfúrico, proporcionando por sua vez a formação de chuvas ácidas. Os impactos na saúde são nomeadamente problemas respiratórios (Al-Delaimy *et al.*, 2020; Tan, 2014).

Na queima de combustíveis com enxofre, este é oxidado a SO_2 segundo a equação química da Figura 19. Parte do SO_2 produzido durante o processo de combustão é por sua vez, oxidado a SO_3 sendo que esta reação pode acontecer ainda no motor, nas condutas dos gases de exaustão ou na atmosfera. Uma vez na atmosfera, o SO_3 reage com a água da chuva formando ácido sulfúrico (H_2SO_4). A presença simultânea de SO_2 e água da chuva (H_2O) podem também formar uma solução de ácido sulfuroso (H_2SO_3) (Okubo & Kuwahara, 2020).

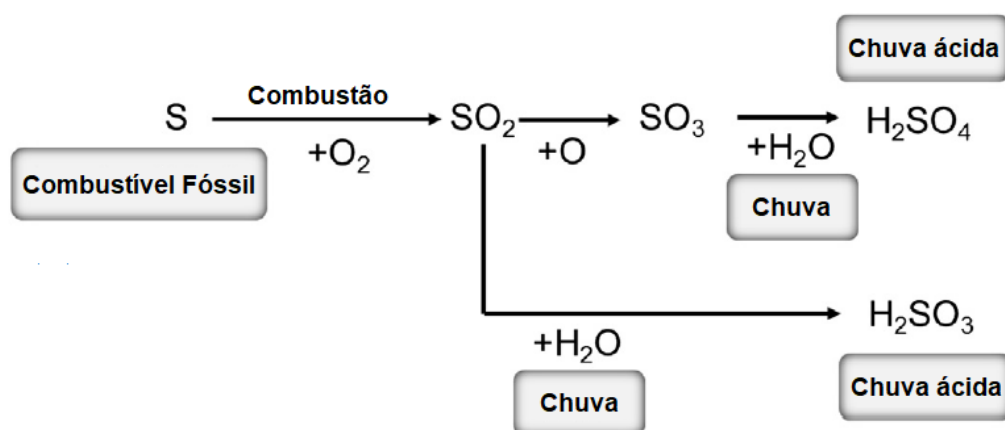


Figura 19 - Esquema reacional da formação de SO_2 e chuvas ácidas (Adaptado de Okubo & Kuwahara, 2020).

3.3.3. Óxidos de azoto

Embora existam diversas espécies de óxidos de azoto (NO_x), a mais importante é o dióxido de azoto (NO_2), seguido pelo monóxido de azoto (NO) (WHO, 2021).

O NO é um gás incolor, insípido, inodoro e pouco tóxico, não sendo um poluente perigoso, oxida espontaneamente a NO_2 quando em contacto com o ar (APA, 2021d).

O NO_2 é um gás acastanhado com um forte odor característico. É um composto com poder oxidante muito forte que ao reagir com água forma ácido nítrico (HNO_3) e óxido nítrico (N_2O). Provindo de fontes primárias antropogénicas (queima de combustíveis fósseis por exemplo) e fontes de emissão secundárias, a formação destes compostos tem origem na reação do oxigénio com o azoto atmosférico a altas temperaturas (APA, 2021d; Okubo & Kuwahara, 2020; WHO, 2021).

Trata-se de um composto que aumenta a disfunção pulmonar e os riscos de infeção respiratória, podendo causar também danos ao sistema nervoso central e irritações nos olhos e na garganta. A nível ambiental é um precursor para a formação de ozono troposférico, matéria particulada e chuvas ácidas que por sua vez são responsáveis de causar a eutrofização de habitats aquáticos e a contaminação de lençóis de água subterrâneos (Al-Delaimy *et al.*, 2020; APA, 2021d).

As chuvas ácidas são formadas pela reação do NO_2 com o oxigénio presente no ar que forma pentóxido de azoto (N_2O_5), e que por sua vez, reage com a água das chuvas formando ácido nítrico (HNO_3) (Okubo & Kuwahara, 2020).

Na presença de radiação solar ou radiação ultravioleta, os NO_x atuam também como oxidantes fotoquímicos reagindo com compostos orgânicos voláteis (por exemplo hidrocarbonetos) de forma a dar origem a partículas que compõem o “smog” (Okubo & Kuwahara, 2020).

As reações descritas anteriormente encontram-se representadas nas Figuras 20 e 21.

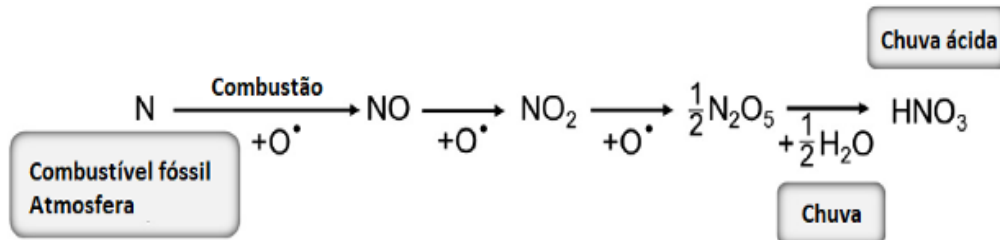


Figura 20 - Esquema reacional da formação de NO₂ e chuvas ácidas (Adaptado de Okubo & Kuwahara, 2020).

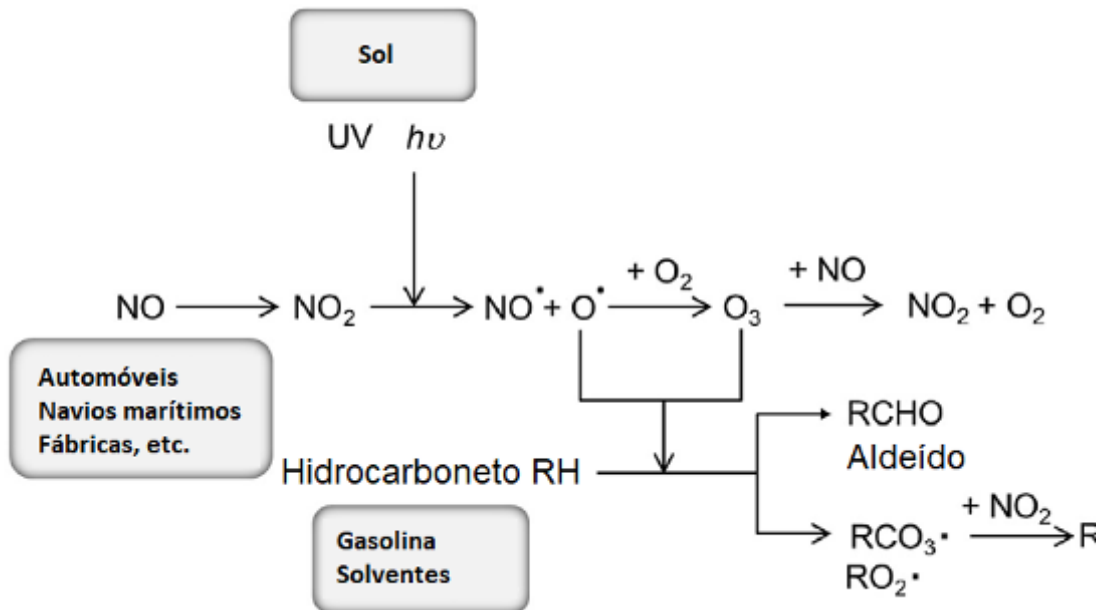


Figura 21 - Esquema reacional para a formação de NO₂ e partículas (Adaptado de Okubo & Kuwahara, 2020).

3.3.4. Monóxido de Carbono

O monóxido de carbono (CO) trata-se de um gás incolor, não irritante, sem odor e tóxico. É característico por ser produzido em combustões incompletas e emitido por fontes primárias. Trata-se de um gás que é solúvel na corrente sanguínea e que reage com a hemoglobina, interferindo posteriormente na distribuição de oxigénio. Geralmente provoca fadiga, dores de cabeça, danos neurológicos e enjoos podendo causar a morte quando inalado em quantidades significativas (Al-Delaimy *et al.*, 2020; WHO, 2021).

3.3.5. Ozono

O ozono (O₃) é o gás que compõe principalmente o “smog”. Este encontra-se presente na estratosfera do planeta Terra, formando uma camada fina denominada por camada de ozono, sendo esta responsável pela absorção da radiação ultravioleta B (UVB) emitida pelo Sol. Contudo, o ozono prejudicial à saúde humana é denominado de ozono troposférico e é formado através de reações fotoquímicas de poluentes, como COVs, monóxido de carbono e NO_x de origem antropogénica e biogénica (Al-Delaimy *et al.*, 2020; Lichtfouse & Schwarzbauer, 2020).

Trata-se de um composto instável e com um forte poder oxidante. As concentrações deste poluente são geralmente superiores em zonas rurais quando comparadas com zonas urbanas devido à distância que os percursores que dão origem a este poluente atingem ao serem transportados na atmosfera. As concentrações máximas são atingidas sobretudo no verão onde à maior radiação de emissões UVB, sendo esta a principal responsável pelas reações fotoquímicas que formam o ozono (Lichtfouse & Schwarzbauer, 2020).

A nível da saúde humana este diminui a capacidade pulmonar, aumenta os problemas respiratórios, provoca irritação nos olhos e bronco contrições (Al-Delaimy *et al.*, 2020).

O O₃ é um compostos foto tóxico, no qual existe uma diversidade de plantas que são sensíveis a este poluente, fazendo com que o mesmo seja extremamente prejudicial a atividades agrícolas, diminuindo o rendimento das mesmas (Lichtfouse & Schwarzbauer, 2020).

3.3.6. Gases com Efeito de Estufa

Os gases com efeito de estufa (GEE) são um conjunto de gases que incluem o CO₂, o metano (CH₄), compostos per fluorados (CPF), entre outros. Grande parte destes gases são emitidos para a atmosfera por fontes naturais, e encontram-se presentes na atmosfera já há bastante tempo. Contudo, devido à ação humana as concentrações destes gases têm aumentado drasticamente na atmosfera provocando alterações climáticas e fenómenos meteorológicos extremos (Tan, 2014).

Enquanto o CO₂ forma-se principalmente na queima de combustíveis, o CH₄ provem da indústria petrolífera, da degradação biológica de biomassa e da indústria agrícola. Já o CPF e hidrofluorcarbonetos (HFC) são emitidos a partir de vários processos industriais (Tan, 2014).

Os GEE são gases que afetam a atmosfera, especialmente o equilíbrio energético do planeta, e conseqüentemente o clima. Estes gases permitem que a radiação solar infravermelha penetre na atmosfera terrestre e seja aprisionada, resultando no aumento da temperatura média da superfície da Terra. Os GEE contribuem também para a diminuição da camada de ozono (O₃), aumentando a penetração de radiação UVB. A nível da saúde humana, a diminuição da camada de ozono está relacionada com o aumento do cancro de pele e supressão do sistema imunológico (Tan, 2014).

O oceano absorve os gases e poluentes atmosféricos, sendo assim reconhecido como um regulador essencial do clima no planeta. Este contém cerca de cinquenta vezes mais carbono do que a atmosfera, tornando-se o maior recetor de CO₂ existente e responsável por o equilibrar. Contudo, esta absorção faz com que as águas oceânicas diminuam o pH, processo conhecido por acidificação oceânica, tendo um grande impacto nos ecossistemas marinhos (Marcovecchio *et al.*, 2017).

Este processo ocorre quando o CO₂ reage com a água do mar formando outras substâncias químicas que promovem esta acidez. Para além de diminuir a concentração de outros compostos importantes para a subsistência de organismos marinhos, como por exemplo o carbonato de cálcio, considera-se que a absorção de CO₂ tem diminuído os impactos globais relativos à emissão deste gás. Os efeitos da acidificação das águas oceânicas são mais significativos nas zonas costeiras do que no oceano aberto, uma vez que estas zonas já sofrem com outras fontes de poluição antropogénicas e

impactam diretamente na qualidade da vida das populações costeiras (Endres *et al.*, 2018; Hunter *et al.*, 2011).

3.4. Restrições, legislação e controlo

3.4.1. Recomendações Internacionais

A Organização Mundial de Saúde é responsável pela criação de *Guidelines* para que haja uma base quantitativa de recomendações para o controlo e gestão da qualidade do ar, expressas para períodos longos e curtos. Estas recomendações são expressas em concentrações de poluentes chaves. A excedência das *Air Quality Guidelines* (AQG) está associada a grandes riscos de saúde pública, embora as mesmas não estejam legisladas, servem de base para os Estados-Membros possuírem informações evidenciadas para a criação de leis e políticas. Em última instância estas *Guidelines* têm como por objetivo guiar organizações e órgãos governamentais a diminuir as emissões, e consequentemente reduzir o risco de doenças associados à exposição das populações aos poluentes atmosféricos. Alguns dos objetivos específicos da OMS são os seguintes (WHO, 2021):

- Providenciar recomendações com informação devidamente evidenciada na forma de níveis de AQG incluindo as indicações no formato de concentração de poluentes relacionados com parâmetros críticos da exposição, em médias horárias, dos poluentes PM_{2,5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, O₃ e CO.
- Providenciar objetivos provisórios para uma transição guiada de forma a facilitar o caminho para países que excedem substancialmente os níveis de concentração dos poluentes mencionados.
- Providenciar declarações quantitativas sobre as boas práticas para uma gestão eficaz de certos tipos de matéria particular, como o carbono negro e elementar (CN/CE), partículas ultrafinas (PUF) e partículas originadas a partir de areias e tempestades de areia (ATA), para os quais a informação disponível é insuficiente para determinar os níveis AQG, mas indicam o risco de exposição.

Seguidamente são apresentados, na Tabela 2, os níveis AQG para os poluentes mencionados anteriormente (WHO, 2021).

Tabela 2 - Objetivos e níveis AQG para os vários poluentes.

Poluentes	Média horária	Níveis AQG
PM _{2.5} (µg/m ³)	Anual	5
	24 horas	15
PM ₁₀ (µg/m ³)	Anual	15
	24 horas	45
O ₃ (µg/m ³)	Pico de época	60
	8 horas	100
NO ₂ (µg/m ³)	Anual	10
	24 horas	25
SO ₂ (µg/m ³)	24 horas	40
CO (mg/m ³)	24 horas	4

A crescente preocupação com a proteção do meio ambiente e a saúde pública levou à implementação de legislação específica e de regulamentos que visam controlar as emissões dos navios cruzeiros. O controlo das emissões dos navios cruzeiros é essencial para a proteção do ambiente e a promoção de uma indústria turística sustentável.

A legislação aplicável aos navios varia em função da bandeira sob a qual operam. O elemento que atribui a nacionalidade ao navio é a bandeira de Estado onde este foi registado. Inicialmente a bandeira de estado era usada pelos navios como elemento simbólico do país a que pertenciam. Contudo, com o avançar do tempo este símbolo tornou-se um objeto legal e obrigatório na indústria naval, tornando-se assim a representação das leis da nação pela qual os navios se regem. Por outro lado, para que um estado se possa tornar uma Bandeira de Estado, este necessita de ter condições financeiras e uma infraestruturas técnica marítima necessárias e aderir às normas impostas pela IMO (EMISA, 2024).

Desta forma, os Estados de Bandeira são obrigados a aplicar e cumprir os regulamentos impostos pela Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (UNCLOS) em todos os navios que arvoem a sua bandeira. A IMO é a entidade responsável pela aplicação dos regulamentos. Os Estados de Bandeira são responsáveis por garantir o

cumprimento dos regulamentos impostos através das autoridades portuárias e sociedades de classificação (EMISA, 2024).

Os Estado de bandeira devem-se orientar pelos principais tratados/convenções marítimos internacionais, especialmente os adotados pela IMO. As principais convenções internacionais são (IMO, n.d.-b):

- Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar (*International Convention for the Safety of Life at Sea*) – Convecção SOLAS 74;
- Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*) - MARPOL (Marine Pollution);
- Convenção Internacional sobre Normas de Formação, Certificação e Serviço de Quartos para marinheiros (*Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers* - STCW);
- Convenção para a facilitação do tráfego marítimo internacional (*Convention on Facilitation of International Maritime Traffic* - FAL 65);
- Convenção Internacional sobre Linhas de Carga (*International Convention on Load Lines* - LL 66) de 1966, incluindo o Protocolo de 1988;
- Convenção Internacional sobre a Responsabilidade Civil pelos Prejuízos Devidos à Poluição por Hidrocarbonetos (*International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage* - CLC/Fundo 92), de 1992, e da Convenção Internacional para a Constituição de um Fundo Internacional para Compensação pelos Prejuízos Devidos à Poluição por Hidrocarbonetos (*International Convention on the Establishment of an International Fund for Compensation for Oil Pollution Damage*), 1992.

A convenção MARPOL foi adotada como resposta ao desastre ambiental provocado pelo navio Torrey Canyon, no canal da Mancha, no sul de Inglaterra em 1967, que provocou o derrame de 120 000 ton de petróleo bruto, provocando vários impactes ecológicos. Este desastre evidenciou a ameaça do aumento tráfego e porte dos navios ao meio ambiente (IMO, n.d.-a).

Em 1978, a IMO realiza modificações à convenção MARPOL, passando esta a ser denominada por MARPOL 73/78, cobrindo não só poluição operacional ou acidental com óleos, mas também poluição provocada por químicos, bens empacotados, águas residuais, lixo e poluição atmosférica (IMO, n.d.-a).

Atualmente a convenção MARPOL é constituída por seis anexos, que foram revistos ao longo dos anos de forma a integrar os conhecimentos científicos a prevenir e minimizar

a poluição causada pelos navios, tanto a poluição acidental como a procedente das operações normais de funcionamento. Os anexos que constituem a Convenção MARPOL atualmente são (Hughes *et al.*, 2022):

Anexo I - Regulamentos para a Prevenção da Poluição por Hidrocarbonetos, entrou em vigor a 2 de outubro de 1983. Este anexo aborda questões da prevenção e da contaminação por hidrocarbonetos devido a derrames operacionais ou acidentais. Estabelece procedimentos de gestão de hidrocarbonetos e dos seus resíduos, bem como procedimentos de construção de navios. Além de indicações técnicas, contém o conceito de “áreas especiais” que são consideradas vulneráveis à poluição de hidrocarbonetos.

Anexo II - Regulamentos para o Controlo da Poluição por Substâncias Líquidas Nocivas Transportadas a Granel, entrou em vigor a 2 de outubro de 1983, detalha os critérios de descarga e as medidas para o controlo da poluição proveniente de substâncias líquidas nocivas transportadas, bem como os requisitos aplicáveis à construção e equipamentos de navios que transportam essas substâncias.

Anexo III - Prevenção da Poluição por Substâncias Prejudiciais Transportadas por Via Marítima em Embalagens, Contentores, Tanque Portáteis, Camiões-Tanque e Vagões-Cisterna, entrou em vigor a 1 de julho de 1992, regula o transporte de substâncias perigosas embaladas e estabelece os requisitos de: embalagem, rotulagem, documentação, armazenagem, limitações quanto à quantidade, exceções e notificações.

Anexo IV - Prevenção da Poluição por Esgoto dos Navios, entrou em vigor a 27 de setembro de 2003, contém requisitos para controlar a poluição proveniente dos esgotos dos navios, nomeadamente as condições de descarga, bem como a distância a que pode ser efetuada.

Anexo V - Prevenção da Poluição por Lixo produzido nos Navios, entrou em vigor a 31 de dezembro de 1988, estabelece as regras para a descarga de resíduos no mar, especifica as distâncias e a forma como estes podem ser eliminados, estabelece ainda “zonas especiais” e as regras de gestão e manutenção de registo dos resíduos gerados no navio. Deste anexo destaca-se a proibição total da eliminação de qualquer forma de plástico no mar.

Anexo VI - Prevenção da Poluição Atmosférica de Navios (entrou em vigor a 19 de maio de 2005): Estabelece limites para as emissões de óxido de enxofre (SO_x) e óxido de azoto (NO_x) e proíbe emissões deliberadas de substâncias que empobrecem a camada de ozono (*Ozone Depleting Substances*). Para além disso, regula também a incineração a bordo e as emissões de COV.

A versão atual do Anexo VI compreende cinco capítulos, nos quais existem trinta e uma regras organizados da seguinte forma (Hughes *et al.*, 2022):

Capítulo 1 (Aplicação) refere-se às definições e à aplicação final das regras.

Capítulo 2 (Levantamento, certificação e meios de controlo) fornece orientação para as vistorias, certificação e meios de controle necessários.

Capítulo 3 (Requisitos para o controlo das emissões dos navios) é dedicado aos requisitos sobre limites e mecanismos de controle para todas as emissões de navios, exceto do CO₂.

Capítulo 4 (Regulamentos da intensidade carbónica no transporte marítimo internacional) refere-se aos regulamentos aplicados às medidas operacionais, técnicas de eficiência energética, redução do consumo de combustível e intensidade carbónica operacional

Capítulo 5 (Verificação do cumprimento com as previsões do Anexo) descreve a verificação do cumprimento das disposições do Anexo VI durante as auditorias.

Existem atualmente onze apêndices do anexo VI e várias orientações em desenvolvimento, de forma a haver uma aplicação harmoniosa e uniforme dos regulamentos (Hughes *et al.*, 2022).

O Anexo VI aplica-se a todos os navios com dimensões superiores a 400 GT (*Gross Tonnage*) e a unidades *offshore* construídas durante ou após 19 de maio de 2005, sendo que os navios construídos antes desta data tiveram de se adaptar até maio de 2008. Ficam excluídos da aplicação navios de guerra, navios auxiliares navais, outros navios operados ou propriedade de um Estado utilizados para serviços governamentais não comerciais. Ficam ainda previstas as exceções em seguida indicadas (Čampara *et al.*, 2018):

- emissões necessárias para assegurar a segurança de um navio ou salvar vidas no mar;

- emissões resultantes de danos a um navio ou ao seu equipamento, desde que tenham sido tomadas todas as precauções razoáveis após os danos que impeçam essa emissão.

Assim, no que toca à poluição atmosférica de navios com 400 GT ou mais, que operam nas águas sob jurisdição dos Estados que adotaram o Anexo VI, ou arvoram sua bandeira, devem possuir um Certificado Internacional de Prevenção da Poluição do Ar abreviado por IAPPC (*International Air Pollution Prevention Certificate*). Para navios com menos de 400 GT, o Estado da bandeira pode estabelecer medidas apropriadas para cumprir as disposições aplicáveis do Anexo VI. Antes de o navio entrar em serviço ou antes da emissão do primeiro certificado IAPPC, todos os navios são submetidos a uma vistoria inicial, conforme definido pelo próprio documento. O Anexo VI tem validade de cinco anos, devendo ser realizada pelo menos uma vistoria periódica intermediária (Čampara *et al.*, 2018).

Os regulamentos atuais do Anexo VI controlam e limitam as seguintes áreas principais:

- emissões de *Ozone Depleting Substances* de instalações de refrigeração e equipamentos de combate a incêndio (regra 12);
- emissões de NO_x de motores diesel marítimos (regra 13);
- emissões de SO_x de navios (regra 14);
- emissões de COV dos tanques de carga de petroleiros (regra 15);
- emissões de incineradores a bordo (regra 16);
- qualidade dos combustíveis marítimos (regra 18);
- eficiência energética dos navios (capítulo 4).

Adicionalmente, às medidas referidas anteriormente, foram criadas certas zonas denominadas por áreas de controlo de emissões (ECA). Estas zonas podem também ser definidas como SECA (*Sulphur Emission Control Areas*) (Transport & Environment, 2023).

As zonas definidas como ECA são zonas onde as restrições relativamente às emissões são ainda mais rigorosas. Estes locais possuem especiais reduções nas emissões de NO_x e SO_x. De momento, estes locais são o Mar Báltico, Mar do Norte, América do Norte e Mar das Caraíbas dos Estados Unidos, incluindo áreas portuárias que a IMO estabeleça como zona ECA (IMO, 2020) .

Na figura 22 encontram-se representadas os limites de enxofre e as medidas quanto ao uso de *scrubbers* em várias zonas do globo.

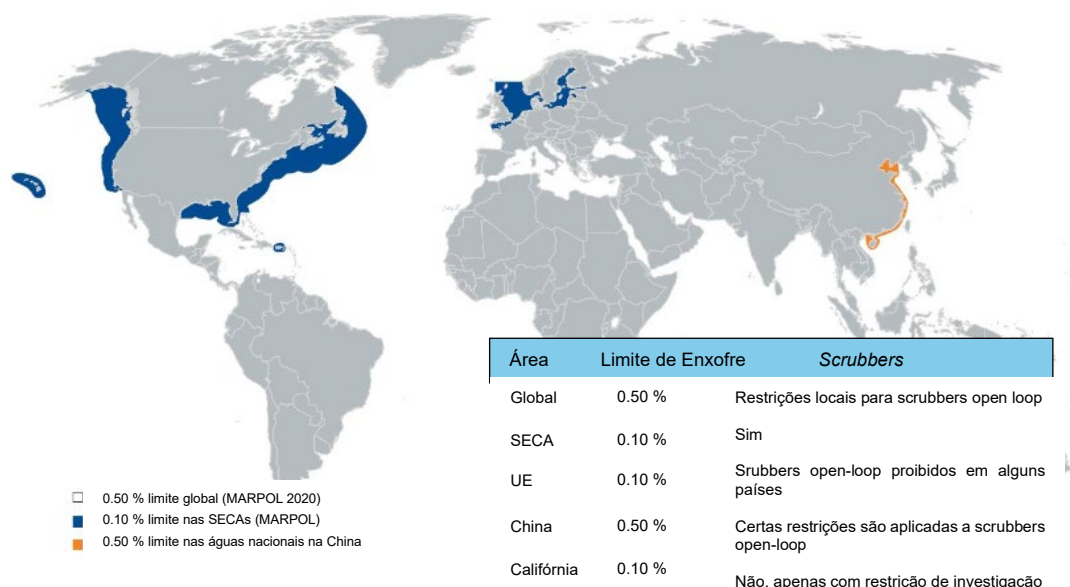


Figura 22 - Limites de enxofre nos combustíveis navais em diversos locais do mundo (Adaptado de Mallidis *et al.*, 2020).

A regulamentação dentro e fora das zonas ECA alterou-se ao longo dos anos. Estas alterações encontram-se seguidamente indicadas (IMO, 2020):

- Redução do teor máximo de enxofre dentro das zonas ECA de 1,5% (m/m) para 1,0% (m/m), em julho de 2010;
- Redução do teor máximo de enxofre dentro das zonas ECA de 1,0% (m/m) para 0,1% (m/m), em janeiro de 2015;
- Redução do teor máximo de enxofre fora das zonas ECA de 4,5% (m/m) para 3,5% (m/m) em janeiro de 2012
- Redução do teor máximo de enxofre fora das zonas ECA 3,5% (m/m) para 0,5% (m/m) em janeiro de 2020.
- A partir de 5 de maio de 2025 o Mar Mediterrâneo irá passar a ser uma zona ECA, de forma que os navios tenham de usar um combustível com um teor de enxofre máximo de 0.1% (m/m) nesta área (IMO, 2024b).

Desta maneira, os navios que operam dentro e fora das zonas ECA geralmente utilizam diferentes combustíveis e equipamentos para cumprir com os limites previstos. Nestes casos, antes dos navios entrarem numa zona ECA, é necessário realizar as respetivas mudanças operativas no navio, de modo a estarem compatíveis para navegar nestas áreas (IMO, 2020).

3.4.2. Legislação europeia

A União Europeia (UE) instituiu três diretivas de forma a estabelecer os valores limite, medidas e redes de monitorização de forma a melhorar a qualidade do ar dos Estados-Membros.

A Diretiva 2008/50/CE é relativa à qualidade do ar ambiente e um ar mais limpo na Europa. Esta diretiva tem como por objetivos:

- Definir e fixar metas relativas à qualidade do ar de forma a prevenir ou reduzir efeitos nocivos para a saúde das populações e ambiente;
- Avaliar a qualidade do ar dos Estados-Membros;
- Obter informações quanto à qualidade do ar e garantir que os dados recolhidos são colocados à disposição do público;
- manter a qualidade do ar quando boa e melhorá-la quando má;
- Promover uma maior cooperação entre os Estados-Membros de forma a reduzir a poluição atmosférica.

A Diretiva 2004/107/CE estabelece os valores limites aos poluentes arsénio, cádmio, níquel e aos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos no ar ambiente. Tem como por objetivo assegurar e determinar métodos e critérios de avaliação para as concentrações dos poluentes mencionados de forma a manter ou melhorar a qualidade do ar.

Por fim, a Diretiva (UE) 2015/ 1480 é referente aos métodos de avaliação e localização dos pontos de amostragem para a avaliação da qualidade do ar ambiente.

Os valores limites para os poluentes SO₂, NO₂, CO, PM_{2,5}, PM₁₀ e O₃ são superiores aos apresentados pela OMS. A Figura 23 compara a percentagem da população na UE que se encontra exposta a concentrações nocivas de alguns dos poluentes mencionados, segundo os valores limites em vigor e segundo as *Guidelines* da OMS (Conselho Europeu & Conselho da União Europeia, 2024).

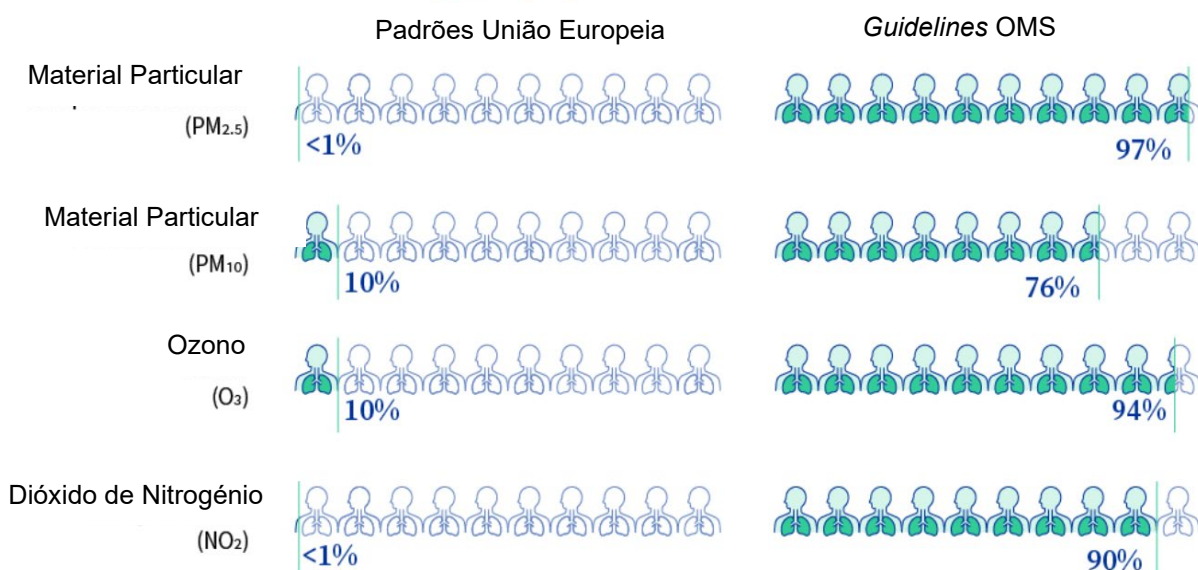


Figura 23 - Comparação entre a população europeia exposta a concentrações nocivas dos poluentes PM_{2.5}, PM₁₀, O₃ e NO₂, segundo os valores limites em vigor e segundo as recomendações da OMS (Adaptado de Conselho Europeu & Conselho da União Europeia, 2024).

Assim, o Conselho Europeu chegou a um acordo provisório no dia 2 de outubro de 2024 sobre a proposta de estabelecer normas de qualidade do ar alinhadas com as recomendações da OMS e alcançar a poluição zero até 2050 (Conselho Europeu & Conselho da União Europeia, 2024).

A legislação europeia, no que se toca à proteção ambiental marítima contra a poluição efetuada pelos navios, reforça as disposições da Convenção MARPOL. Desta maneira, a UE estabelece regulamentação especialmente incidentes nos limites de teor de enxofre dos combustíveis utilizados na proximidade das cidades portuárias em conformidade com a IMO.

Na Europa, a Diretiva 2016/802/UE de 11 de maio com o objetivo de reduzir as emissões de dióxido de enxofre resultantes da combustão estabelece que os Estados-Membros devem tomar medidas para assegurar que “os navios atracados em portos da União não utilizam combustíveis navais cujo teor de enxofre seja superior a 0,10 % em massa, dando à tripulação tempo suficiente para terminar as eventuais operações de substituição do combustível, o mais depressa possível depois da atracagem e o mais tarde possível antes da partida.” Em alternativa à utilização de combustíveis de baixo teor de enxofre utilizem métodos de “redução das emissões que permitam reduzir as emissões de dióxido de enxofre em grau pelo menos equivalente ao que conseguiriam obter se utilizassem combustíveis navais” de baixo teor de enxofre. Para verificar o

cumprimento destas normas os Estados-Membros devem ainda realizar com frequência análises a amostras dos combustíveis colocados a bordo, devendo também verificar regularmente o diário de bordo e as guias referentes à entrega (*Bunker Delivery Notes*) do combustível dos navios, seguindo a Decisão de Execução 2015/253/UE, de 16 de fevereiro e a Diretiva (EU) 2016/802.

A legislação em vigor permite a utilização de métodos de redução de emissões aprovados pelo Regulamento (CE) n.º 2099/2002, como alternativa à utilização de combustíveis navais onde as suas emissões de dióxido de enxofre sejam em grau pelo menos equivalente ao que conseguiriam obter se utilizassem combustíveis navais que respeitem os requisitos.

A nova Estratégia da UE para Mobilidade Sustentável e Inteligente também enfatiza a necessidade de reduzir as emissões de GEE no setor marítimo, promovendo a utilização de combustíveis mais limpos e tecnologias inovadoras (COM/2020/789, 2020.)

3.4.3. Legislação Nacional

Em Portugal, a legislação nacional está alinhada com as diretrizes europeias e internacionais. Em território nacional são cumpridos os padrões da UE, possuindo uma rede de monitorização e cumprindo com as normas exigidas para a qualidade do ar aplicadas nos restantes Estados-Membros (Decreto-Lei n.º 47/2017).

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) é responsável por promover e implementar uma política de avaliação e gestão da qualidade do ar, onde são previstos os valores limites para concentrações de cada poluente estabelecidos pela UE. Caso se verifique que estes limites são ultrapassados, as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regionais (CCDR) e Direções Regionais Autónomas (DRA) têm a obrigação de comunicar à população tendo em vista a diminuição da exposição da mesma a estas condições. Assim, esta informação encontra-se representada na Tabela 3, a qual apresenta os valores limites para um certo tempo de exposição que a população pode estar exposta com baixo risco prejudicial à saúde (APA, 2021b; Decreto-Lei n.º 47/2017).

Tabela 3 - Valores limites os principais poluentes estabelecidos pelo Decreto-Lei n.o 102/2010.

Poluente	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Período
PM _{2,5}	20	1 ano
Dióxido de Enxofre	350	1 hora
	125	24 horas
Dióxido de Azoto	200	1 hora
	40	1 ano
PM ₁₀	50	24 horas
	40	1 ano
CO	10	Máximo diário de medidas de 8 horas

Em Portugal são estabelecidos objetivos da qualidade do ar ambiente, limiares de informação e alerta para os níveis de qualidade a curto prazo (horários/diários) e a longo prazo (anual) (APA, 2021). Foi criado um sistema de informação online, sendo este a QualAr, onde são apresentados os resultados da monitorização da qualidade do ar em Portugal. Os resultados das medições efetuadas através das redes de medição, passam por vários níveis de verificação e são enviados em tempo real para a plataforma da QualAr e para a Agência Europeia do Ambiente (AEA) (APA, 2021e).

O cálculo destes índices é realizado através de médias aritméticas da concentração dos poluentes registadas de acordo com dois critérios (APA, 2021a):

1. Zonas – Obrigatório a medição dos poluentes ozono (O_3) e partículas (PM₁₀ ou PM_{2,5});
2. Aglomerações – Obrigatório a medição dos poluentes: dióxido de azoto (NO_2) e partículas (PM₁₀ ou PM_{2,5}).

Em ambos os casos, as medições de SO_2 podem também estar incluídas. O método de cálculo do Índice QualAr encontra-se representado na Figura 24 (APA, 2021a).

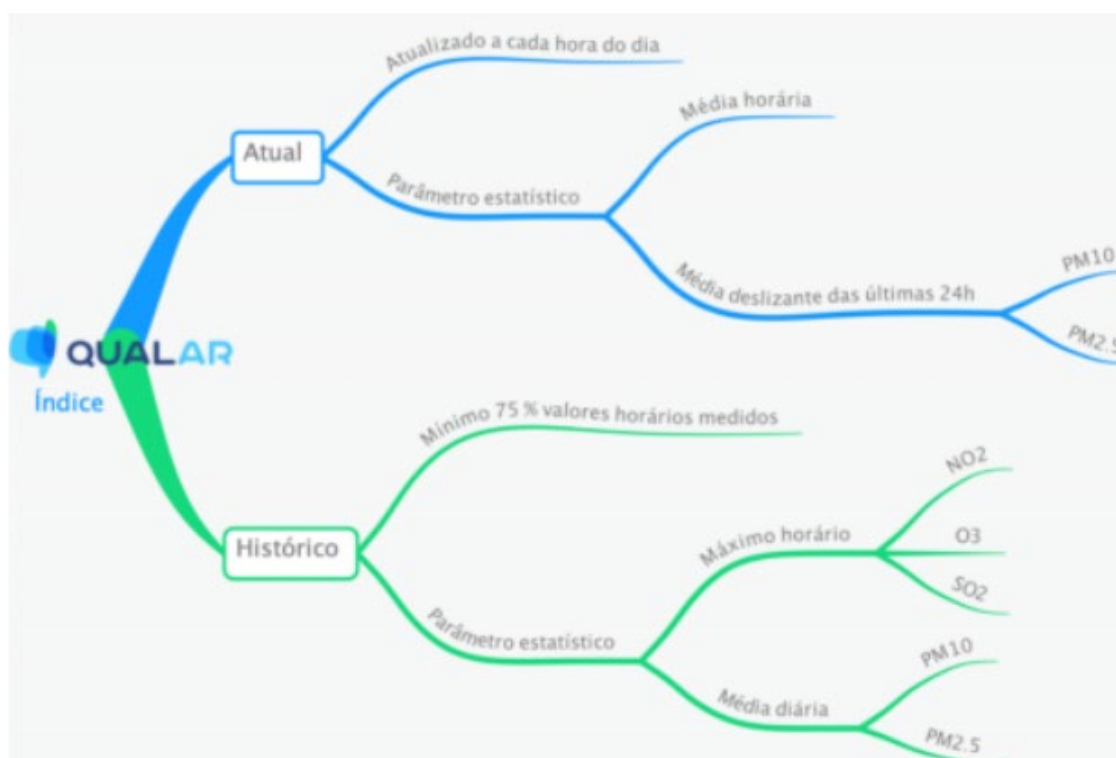


Figura 24 - Método de cálculo do Índice QualAr (APA, 2021a).

As unidades de medida da concentração dos poluentes neste índice são $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e mg/m^3 (no caso do CO). São utilizados intervalos de concentração específicos para cada poluente de forma a atribuir-se a classificação geral, sendo que estes valores se encontram representados na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação do Índice QALAR para os principais poluentes medidos (APA, 2021a).

Classificação	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Muito Bom	0-20	0-10	0-40	0-100
Bom	21-35	11-20	41-100	101-200
Médio	36-50	21-25	101-200	201-350
Fraco	51-100	26-50	201-400	351-500
Mau	101-1200	51-800	401-1000	501-1250

Relativamente às emissões gasosas dos navios, Portugal aprovou a adesão à Convenção MARPOL 73/78 em 1987 pelo Decreto do Governo n.º 25/87. A Convenção MARPOL e os seus anexos foram objeto de sucessivas emendas, aprovadas através dos seguintes diplomas:

- Decreto n.º 48/90, de 7 de novembro (emendas de 1984 ao Anexo I);
- Decreto n.º 19/98, Decreto n.º 20/98, Decreto n.º 22/98 e Decreto n.º 23/98, de 10 julho (diversas emendas efetuadas entre 1989 e 1992 ao I e II);
- Decreto do presidente da República n.º 173/99 de 5 de agosto;
- Decreto n.º 6/2006 de 6 de janeiro.

Em 2008 o Decreto-Lei n.º 1/2008 de 9 de janeiro aprova o Protocolo de 1997 relativo à Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios, 1973, modificada pelo Protocolo de 1978, MARPOL 73/78, relativo às regras para a prevenção da poluição atmosférica por navios, adotado em Londres, em 26 de setembro de 1997.

O Decreto-Lei n.º 281/2000 de 26 de abril na sua atual redação, com quatro modificações introduzidas pelos Decreto-Lei n.º 69/2008, Decreto-Lei n.º 142/2010, Decreto-Lei n.º 107- B/2014 e pela última vez pelo Decreto-Lei 106/2021, estabelece as regras para a implementação da MARPOL e outras convenções relacionadas referentes ao limite máximo de teor de enxofre permitido nos combustíveis navais, no mar territorial português, zona económica exclusiva e zonas de controlo da poluição. Na última alteração do Decreto-Lei n.º 281/2000 não foram introduzidas alterações aos limites do teor de enxofre nos combustíveis, mas foram introduzidas medidas essenciais para assegurar a efetiva fiscalização do cumprimento dos limites máximos de teor de enxofre e o sancionamento das infrações detetadas. Nomeadamente as regras relativas à recolha de amostras e à apresentação de relatórios no âmbito da Decisão de Execução (UE) 2015/253.

A Tabela 5 resume a evolução da legislação em vigor no território nacional.

Tabela 5 - Legislação aplicada quanto teor de enxofre máximo nos combustíveis navais (Adaptado de DGRM, 2018).

Data	Teor máximo de enxofre	Aplicação	Requisitos Legais
Regra geral			
Até 31/12/2012	4,5%		Regra 14.1 do Anexo IV da MARPOL
A partir de 1/1/2013 a 31/12/2019	3,5%	Todos os navios e embarcações independentemente da bandeira que arvoram	Regra 14.1 do Anexo IV da MARPOL e Artigos 3.º-A e 4.º-A (1) do Decreto-Lei n.º 170-B/2014, de 7 de novembro.
Desde 1/1/2020	0,5%		
Zonas de Controlo de Emissões			
Até 30/06/2010	1,5%		Regra 14.4 do Anexo IV da MARPOL
A partir de 01/07/2010 a 31/12/2014	1%	Todos os navios e embarcações	
A partir de 1/1/2015	0,1%		Regra 14.4 do Anexo IV da MARPOL e Artigo 4º-B (3) do Decreto-Lei n.º 170-B/2014, de 7 de novembro
Navios de passageiros que efetuem serviços regulares com partida ou destino em portos da União Europeia			
31/12/2019	1,5%	Mar territorial português, zona económica exclusiva e zonas de controlo de poluição que se situem fora das zonas de controlo de emissões de SO _x	Artigo 4º-B (2) do Decreto-Lei n.º 170-B/2014, de 7 de novembro
Teor máximo de enxofre nos combustíveis navais utilizados por navios nos portos nacionais			
A partir de 1/1/2010	0,1%	Portos nacionais	Artigo 4º-B (1) do Decreto-Lei n.º 170-B/2014, de 7 de novembro

No que toca aos objetivos relacionados com a redução das emissões efetuadas pelos transportes marítimos em Portugal Continental, na zona exclusiva (faixa de mar com 200 milhas náuticas de extensão, cerca de 370 quilómetros na qual Portugal tem prioridade na utilização dos recursos naturais e é responsável pela proteção do meio ambiente) e nas zonas de controlo de poluição (faixas de mar com extensão igual ou inferior à zona económica exclusiva, as quais são definidas para prevenir, reduzir e controlar a poluição provocada por embarcações, de acordo com as regras internacionais aplicáveis), o Decreto-Lei n.º 84/2018, de 23 de outubro de 2018, que

assegurou a transposição da Diretiva(EU) 2016/2284 de 14 de dezembro, fixa os compromissos nacionais de redução de emissões de dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de azoto (NO_x), COVNM, amoníaco (NH₃) e partículas finas (PM_{2,5}), para 2020 e 2030. Este estabelece a obrigatoriedade de elaborar, adotar e executar o Programa Nacional de Controlo da Poluição Atmosférica (PNCPA), bem como de proceder à monitorização dos impactos causados pela poluição atmosférica nos ecossistemas terrestres e aquáticos. Este Decreto-Lei também prevê a comunicação dos respetivos resultados à Comissão Europeia e à Agência Europeia do Ambiente (APA, 2021c).

O Decreto n.º 19/2018 de 29 de junho de 2018, aprova a alteração do texto e dos anexos II a IX e o aditamento dos anexos X e XI ao Protocolo à Convenção de 1979 sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça a Longa Distância relativo à Redução da Acidificação, da Eutrofização e do Ozono Troposférico, adotados em Genebra, em 4 de maio de 2012. Estas alterações estabelecem novos compromissos de redução de emissões atmosféricas para 2020 e anos subsequentes, dos quatro poluentes do Protocolo (enxofre, óxidos de azoto, compostos orgânicos voláteis e amoníaco) e, pela primeira vez, das partículas finas. Introduzem ainda a definição de carbono negro como constituinte das partículas em suspensão e atualizam os anexos técnicos relativos aos valores limite de emissão dos poluentes atmosféricos provenientes de fontes estacionárias e móveis (APA, 2021c).

3.4.4. Regulamentação do Porto de Lisboa

A Administração do Porto de Lisboa (APL) na qualidade de Autoridade Portuária elaborou conforme o Decreto-Lei n.º 46/2002, de 2 de março, um conjunto de normas e instrumentos reguladores das atividades portuárias, aprovados no Regulamento de Autoridade Portuária da APL, S.A. (Anexo à Ordem de Serviço n.º 19/2014). Este Regulamento tem como objetivo estabelecer os termos e condições ambientais, de segurança portuária e de navegação na área de jurisdição da APL, sem prejuízo da aplicação de outras normas convencionais, legais ou regulamentares aplicáveis (APL, 2014).

Devido à composição dos combustíveis utilizados pelos navios, ao longo dos anos foram implementadas medidas para que houvesse um compromisso entre os poluentes que

são emitidos na área do Porto de Lisboa, e os navios que escalam neste porto (APL, 2023e).

As medidas de maior importância tomadas, para que houvesse um equilíbrio, foram:

- Caso o navio pretenda apenas utilizar HFO como combustível, este deverá possuir *scrubbers* em *close loop*;
- Caso o navio faça a troca de HFO para MGO este não necessita de utilizar *scrubbers* em porto;
- É totalmente proibido realizar descargas, seja de água de lavagens ou de outros resíduos na área do porto de Lisboa;

As medidas tomadas têm como base a diretiva das emissões de enxofre da União Europeia Diretiva (UE) 2016/802 relativa à redução do teor de enxofre nos combustíveis e às diretrizes criadas pela IMO.

Assim, a APL realiza inspeções de modo a identificar e caracterizar os equipamentos dos navios de cruzeiro tal como o combustível utilizado e a composição do mesmo, com o auxílio dos oficiais de ambiente (APL, 2023e).

Capítulo 4

Modelos de dispersão de poluentes

Os modelos de dispersão de poluentes pretendem simular matematicamente os processos complexos de disseminação destes gases na atmosfera. Existem diversos modelos para o cálculo de dispersão de poluentes, contudo, antes de se escolher o modelo a utilizar deve-se avaliar todos os parâmetros relevantes para cada um deles (Vallero, 2019).

4.1. Modelos de Caixa

Os modelos de caixa ou “*Box Models*” providenciam um cálculo mais simples, sendo a dispersão de poluentes tratada como se estes se encontrassem dentro de uma caixa retangular, onde a massa dos mesmos é conservada. Considera-se que a caixa está orientada segundo a direção do vento (u). A Figura 25 demonstra a forma que este modelo é considerado (Vallero, 2019).

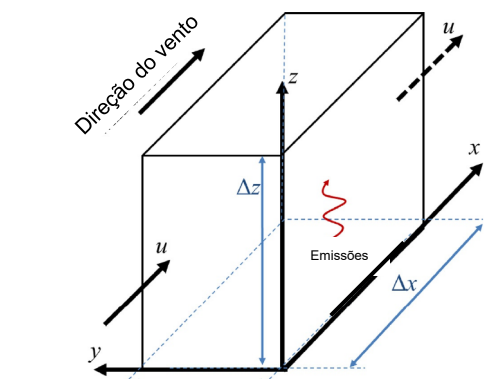


Figura 25-Illustração do modelo de caixa (Adaptado de Valero, 2019).

Este tipo de modelo ainda assume que os poluentes se encontram perfeitamente misturados entre si numa caixa de volume (V) e com uma concentração homogénea. Este modelo serve essencialmente para determinar a dispersão de poluentes no estado estacionário (Vallero, 2019).

4.2. Modelos de Janela

Os modelos de janela ou “*Model Frames*” podem ser classificados em estatísticos e/ou deterministas. Modelos estatísticos incluem outros modelos de dispersão, como por exemplo, os modelos Langrageanos, que seguem um movimento com um volume controlado desde a fonte de emissão até ao seu recetor. Estes são várias vezes assumidos como modelos de dispersão Gaussianos na fonte de emissão, considerando que as concentrações dos poluentes se encontram distribuídas segundo uma distribuição normal, tanto na vertical como na horizontal (Vallero, 2019).

Os modelos determinísticos são utilizados quando qualquer fenómeno químico, físico ou outro processo, a que o poluente possa estar sujeito, são suficientemente bem entendidos para serem incorporados nas movimentações dos mesmos, depois de serem emitidos. É um tipo de modelo bastante difícil de ser desenvolvido pois cada processo deve ser bem descrito por um conjunto de algoritmos, devendo ser considerados a cinética e os balanços de massa do sistema (Vallero, 2019).

Os modelos híbridos são modelos que são tanto estatísticos como deterministas. Por exemplo, quando um sistema é sobretudo aleatório, o modelo é desenvolvido com base num modelo estatístico. No entanto, se houver um bom conhecimento dos princípios físicos de um certo processo, o modelo é desenvolvido com base num modelo determinista (Vallero, 2019).

Assim, um Modelo de Janela pode ser desenvolvido segundo as metodologias anteriormente descritas dependendo do conhecimento que se tem do sistema (Vallero, 2019).

4.3. Modelo de Pluma Gaussianos

Os modelos de pluma Gaussiana são modelos baseados em estatísticas aleatórias de como a pluma irá mudar de tamanho, sendo este determinado através de desvios padrão em secção cruzada (eixos de xx e yy) e em altitude (eixo zz). A Figura 26 demonstra as formas que o modelo considera que a pluma pode adotar (Vallero, 2019).

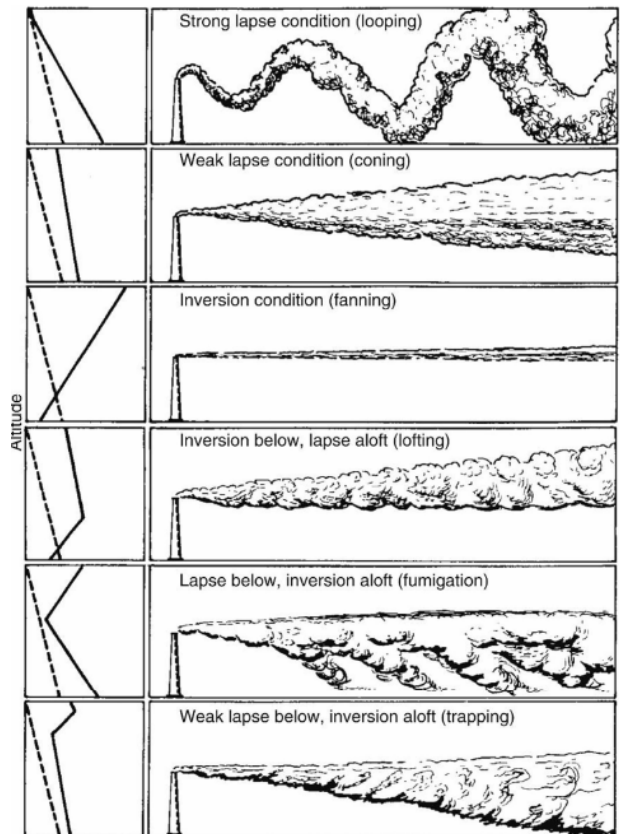


Figura 26 - Formas que o modelo da curva Gaussiana prevê que a pluma possa adotar (Valero, 2019).

Os modelos Gaussianos são baseados tanto em modelos Eulerianos como em modelos Lagrangeanos, pois a pluma de poluentes move-se tendo em conta a visão do observador, segundo as dimensões Cartesianas (x, y, z). Porém, a distribuição normal dos poluentes encontra-se aleatoriamente distribuída. Este modelo considera que a taxa de emissões é proporcional à concentração dos poluentes e os desvios padrão da concentração da pluma estão empiricamente relacionadas com o nível de turbulência atmosférico, que aumenta com a distância à fonte. Na sua forma simplificada, este modelo ignora as transformações químicas ao longo do tempo e outros processos de

remoção que possam acontecer entre a fonte e o recetor. A Figura 27 demonstra a dispersão prevista pela curva Gaussiana (Valero, 2019).

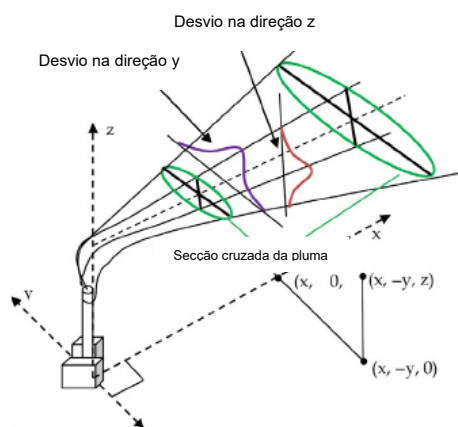


Figura 27 - Dispersão prevista pela curva Gaussiana (Adaptado de Valero, 2019).

A aplicação deste modelo é compreendida em várias etapas.

Estabilidade Meteorológica – Começa-se por determinar a estabilidade meteorológica, e para tal é necessário saber a velocidade do vento e a radiação média, caso se determine a estabilidade durante o dia, ou a nebulosidade caso se determine a estabilidade durante a noite. Esta classificação é uma escala que varia entre A (mais instável) até G (mais estável) segundo a classificação de Pasquill. A Tabela 6 apresenta os valores desta classificação (Tiwary & Williams, 2019):

Tabela 6 - Estabilidade meteorológica de Pasquill.

Velocidade do Vento	Dia Radiação (W/m ²)			Noite Nebulosidade (oktas)		
	Forte (>590)	Moderado (300-590)	Fraco (<290)	8	4-7	0-3
<2	A	A-B	B	D	G	G
2-3	A-B	B	C	D	E	F
3-5	B	B-C	C	D	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D

Desvios Padrão – Seguidamente, é necessário calcular os desvios horizontais (σ_y) e verticais (σ_z) da pluma. Para tal são utilizadas as equações de Pasquill segundo a estabilidade meteorológica obtida anteriormente. Como este estudo foi realizado no Porto de Lisboa, são utilizadas as equações para zonas urbanas. As equações 1, 2, 3 e 4 encontram-se representadas na Tabela 7 (Tiwary & Williams, 2019).

Tabela 7 - Equações de Pasquill para zonas urbanas.

Estabilidade de Pasquill	σ_y (m)	σ_z (m)	
A-B	$0,32x (1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,024x (1 + 0,001x)^{0,5}$	(1)
C	$0,22x (1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,20x$	(2)
D	$0,16x (1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,14x (1 + 0,003x)^{-0,5}$	(3)
E-F	$0,11x (1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,08x (1 + 0,0015x)^{-0,5}$	(4)

x representa a distância da fonte emissora ao sensor (m).

Velocidade do vento na altura da fonte emissora – A terceira etapa é calcular a velocidade do vento na altura da fonte emissora, utilizando a equação 5 para realizar este cálculo. Por sua vez, é necessário saber o expoente de variação da velocidade do vento de acordo com a estabilidade (p) que se encontra descrito na Tabela 8 (Tiwary & Williams, 2019).

$$u(z) = u_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^p \quad (5)$$

$u(z)$ trata-se da velocidade do vento na altura da fonte emissora, u_0 a velocidade do vento na altura da estação meteorológica (z_0).

Tabela 8 - Valores do expoente p da estabilidade de Pasquill.

Estabilidade de Pasquill	Expoente p
A	0,15
B	0,15
C	0,2
D	0,25
E	0,4
F	0,6

Fator de Flutuabilidade e altura da pluma – Seguidamente, é necessário calcular o fator de flutuabilidade de forma a determinar a altura que a pluma poderá atingir, utilizando a equação 6. Para determinar a altura que a pluma pode atingir são utilizadas as equações 7 ou 8.

$$F_b = w_0 R_0^2 \frac{g}{T_{p0}} (T_{p0} - T_{a0}) \quad (6)$$

- Em que w_0 representa velocidade inicial da pluma (m/s), R_0 o raio da fonte emissora (m), T_{p0} a temperatura inicial da pluma (K) e T_{a0} a temperatura ambiente na altura da chaminé (K).

$$\text{Se } F_b < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 \quad dh = \frac{21 F_b^{0,75}}{u(z)} \quad (7)$$

$$\text{Se } F_b > 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 \quad dh = \frac{39 F_b^{0,6}}{u(z)} \quad (8)$$

Concentração do poluente – Por fim, utiliza-se a equação 9 para calcular a concentração do poluente num certo ponto a uma distância x .

$$q(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi u(z) \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{(z+dh)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (9)$$

Em que Q é o caudal de poluentes que está a ser emitido e $q(x, 0, 0)$ é a concentração do poluente à distância x da fonte.

4.4. Modelos Eulerianos

Os modelos Eulerianos podem incluir os modelos de caixa, numéricos, analíticos, entre outros. Estes modelos têm como base balanços de massa num volume diferencial. A velocidade de campo é utilizada para calcular o movimento do ar, e numa visão de um modelo Euleriano, o caudal de ar é apenas uma função no espaço, sendo esta estacionária ou independente do tempo. Qualquer caudal que não altere a sua magnitude e direção de velocidade é considerado um caudal uniforme. Neste tipo de modelos é assumido condições turbulentas, o que significa que as variáveis consistem em médias e em componentes flutuantes (Vallero, 2019).

4.5. Modelo Escolhido

O método utilizado para o cálculo da dispersão de poluentes neste estudo foi a curva da pluma Gaussiana. A escolha deste modelo deve-se aos seguintes motivos:

- Trata-se de um dos modelos mais utilizados, pois prevê bem o comportamento dos poluentes mesmo na sua forma simplificada;
- Devido à complexidade que outros modelos exigem em termos de dados, todos os dados requisitados por este modelo foram possíveis de serem obtidos tanto com as inspeções como com as estações meteorológicas;
- Embora a sua complexidade, trata-se de um modelo de fácil aplicação. Este considera uma fonte emissora constante o que acaba por ser o caso dos navios, pois estes encontram-se continuamente a queimar combustível.

Capítulo 5

Caso de Estudo

5.1. História do Porto de Lisboa

Acredita-se que a existência do porto de Lisboa dura para além da existência de Portugal. No século XII a.c, povo fenício estabeleceu um porto comercial na margem norte do rio Tejo. (APL, 2023c).

Com o passar do tempo, o Porto de Lisboa continuou a ser ocupado por vários povos que reconheceram o seu potencial devido à localização estratégica que apresenta, sendo estes povos romanos, visigodos e mouros, tornando este porto de comércio um dos mais importantes para a Europa. A 28 de junho de 1147, o povo português conquista a cidade de Lisboa, havendo desde então uma ligação bastante forte entre o povo de Lisboa e este porto (APL, 2023c).

No século XIII, com a evolução da exploração marítima e criação de rotas entre Gibraltar, Inglaterra e os países nórdicos, o Porto de Lisboa tornou-se escala obrigatória para embarcações que transitassem pela costa portuguesa (APL, 2023c).

Mais tarde, os portugueses aventuraram-se à descoberta do mundo, tendo sido este porto o ponto inicial das embarcações para descobrirem os quatro cantos do planeta, tornando-o fundamental para o comércio global da época (APL, 2023c) .

A 18 de abril de 1907, o primeiro Conselho da Administração do Porto de Lisboa toma posse após a promulgação da Carta de Lei de 11 de março desse mesmo ano. Esta Carta de Lei autorizou o governo a explorar por conta própria o porto, numa área de 110 km nas duas margens do rio Tejo, sendo esta área abrangida por 10 concelhos.

Desta maneira, o Porto de Lisboa teve melhoramentos a todos os níveis, incluindo a abertura de novos arrumamentos, assentamento de linhas ferroviárias e construção de novos armazéns que foram indispensáveis para o crescimento constante em que o porto se encontrava. Foram também criados dois grandes entrepostos de mercadorias, sendo estes o de Santa Apolónia e Santos (APL, 2023d) .

A modernização do Porto de Lisboa acelera em 1946 com a Publicação do Decreto-Lei n.º 35716, de 24 de junho, tratando-se do plano de melhoramento do mesmo. Com este planeamento foram executadas diversas obras destacando-se a construção da Gare Marítima de Alcântara e a Gare Marítima da Rocha, decoradas com os painéis de Almada Negreiros. A Gare Marítima da Rocha encontra-se representada na Figura 28. A Gare Marítima de Alcântara foi criada para ser um cais para vários propósitos, enquanto a Gare Marítima da Rocha foi destinada à atracação de navios de passageiros (APL, 2023d).

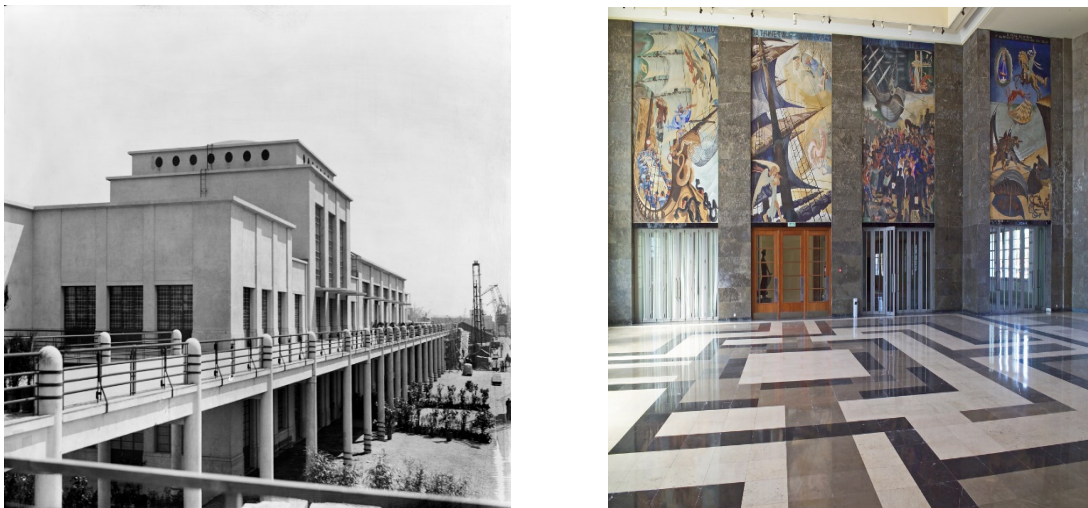


Figura 28 - Gare Marítima da Rocha (1947) e painéis de Almada Negreiros da Gare Marítima da Rocha (APL, 2023d).

Institucionalmente, a Administração do Porto de Lisboa S.A. teve diversos nomes que marcaram a sua história. Inicialmente era intitulada de Exploração do Porto de Lisboa, pelo que em 1987 passou a ser denominado por Administração Geral do Porto de Lisboa pelo Decreto-Lei n.º 309/87 de 7 agosto. Apenas a 13 de novembro de 1998, através do Decreto-Lei n.º 336/98 passa a ser denominada por APL (APL, 2023d).

Já no início do novo milénio, em 2003, é projetada e contruída pelo arquiteto Gonçalo Byrne, a Torre VTS, representada na Figura 29. A VTS presta um serviço de controlo de tráfego marítimo do Porto de Lisboa. A sua função incide no fornecimento de indicações de entrada e saída dos navios na área de jurisdição do Porto de Lisboa, e auxiliar na manobragem dos

mesmos. Sendo esta torre destinada ao controlo de tráfego marítimo, passou a estar aqui instalada a gerência de navegação do Porto de Lisboa (APL, 2023d).



Figura 29 - Torre VTS 2003 (APL, 2023d).

“No passado, no presente e no futuro esteve e estará sempre presente a navegação de cruzeiro; desde 2017 o Porto de Lisboa dispõe de um novo terminal de cruzeiros da autoria do arquiteto Carrilho da Graça, com mais de 1100 metros de cais acostável.” (APL, 2023d). Tal como indica a citação anterior, o terminal de cruzeiros de Lisboa, onde se realizou grande parte deste trabalho, foi inaugurado apenas em 2017, estando este representado na Figura 30.



Figura 30 - Terminal de cruzeiros (APL, 2023d).

O Terminal de Cruzeiros de Lisboa tornou-se uma referência internacional, colocando o Porto de Lisboa entre os portos com melhor qualidade de serviços. O terminal de cruzeiro de Santa Apolónia está concessionado à empresa *Lisbon Cruise Port* (LCP) que também gere a Gare Marítima da Rocha, que continua a ser utilizada esporadicamente para navios de cruzeiros de pequeno porte. Os dois cais em conjunto oferecem 1 490 m de atracação para navios de cruzeiro (APL, 2024b).

Na Figura 31 encontra-se representada a localização destes dois cais.



Figura 31 - Localização da Gare Marítima da Rocha e o Terminal de Cruzeiros de Lisboa (Adaptado de APL, 2024a).

5.2. Impacto dos navios de Cruzeiro na cidade de Lisboa

A indústria de cruzeiros tem um impacto muito positivo na economia da cidade de Lisboa e na economia portuguesa. Segundo um estudo elaborado pela *Nova School of Business and Economics* para a APL, em 2019, a indústria dos cruzeiros em Lisboa foi responsável por 0,16 % do Produto interno bruto nacional. O estudo refere que, em média, cada turista de cruzeiro deixou em Lisboa cerca de 82 € por dia. Por cada euro gasto pelos passageiros é

gerado entre 1,65 € a 3,78 € de contribuição para a economia do país, tendo este um impacto superior ao do alojamento e da restauração (APL, 2023b).

O Porto de Lisboa tem conseguido aumentar consecutivamente ao longo dos anos a quantidade de navios e de passageiros que passam pela cidade de Lisboa. Os dados da evolução do número de escalas e número de passageiros em 2019, 2022 e 2023 encontram-se representados na Tabela 9.

Tabela 9 - Número de escalas totais e *turnaround* e número de passageiros de cruzeiros que passaram pelo Porto de Lisboa em 2019, 2022 e 2023 (Adaptado de APL, 2023b e APL, 2024b).

Ano	Número de escalas	Número de escalas <i>turnaround</i>	Número de Passageiros
2019	310	72	571 259
2022	327	103	462 000
2023	347	107	758 328

O Porto de Lisboa tornou-se recordista de escalas e no seguimento de *turnaround*. O seguimento *turnaround* refere-se à atividade de embarque/desembarque de passageiros no navio de cruzeiro. Em 2022 conseguiu ultrapassar pela primeira vez a centena de escalas em *turnaround*, registando-se 88 292 passageiros neste seguimento, que face a 2019 representou um aumento de cerca de 43 % nas escalas e 21 % nos passageiros. Estes números fizeram com que o Porto de Lisboa ganhasse o prémio de melhor porto da Europa no *World Cruises Awards* (APL, 2023a).

Em 2023, o Porto de Lisboa bateu todos os recordes da atividade de cruzeiros. O número de escalas efetuadas por navios de cruzeiro aumentou, no qual foram realizadas 347 escalas, mais 20 do que em 2022. Em relação à modalidade de *turnaround* registou também um balanço positivo, tendo sido registadas 107 escalas (APL, 2024c).

O aumento do número de escalas refletiu-se no aumento do número de passageiros, tendo-se registado um crescimento de 54% em relação a 2022. No segmento de *turnaround* foi ultrapassado também o antigo recorde contabilizando um total de 204 004 passageiros, representando um aumento de 131% em relação ao ano anterior. Em média, foram registados 1 624 passageiros por escala de *turnaround*, valor que em 2022 foi apenas de 629 (APL, 2024c).

Este número de escalas traduziu-se também num crescimento do número de navios. Cerca de 24 novos navios passaram por Lisboa, 9 dos quais estavam a realizar a sua primeira escala e 4 deles escolheram o Porto de Lisboa como viagem inaugural (APL, 2024c).

O Presidente da APL considera que estes dados confirmam “*o relevante contributo económico do setor dos cruzeiros no tecido económico nacional e regional, com impacto positivo significativo em atividades como o retalho, setor imobiliário, alojamento, restauração, transportes, entre outras*” (APL, 2023b).

A presença dos cruzeiros na cidade de Lisboa, segundo o relatório elaborado pela Comissão permanente de acompanhamento “Lisboa e os cruzeiros” (2023) aprovado pela Assembleia Municipal de Lisboa, não contribuiu para a sobrecarga turística da cidade, reduzindo o efeito da sazonalidade e proporcionando um fluxo constante de turistas na cidade, uma vez que a maior afluência destes é na primavera e outono. Desta forma, turismo de cruzeiros em Lisboa teve assim um impacto positivo em toda a economia do país (2.^a Comissão Permanente, 2023).

Em contraste, um estudo realizado pelo Transport & Environment, em 2022 classificou o Porto de Lisboa como o 5.^o porto com maiores emissões de SO_x da Europa, tendo havido um aumento bastante significativo desde 2019. Ainda assim, a Associação Internacional de Linhas de Cruzeiro conduziu um estudo que demonstrou que o impacto da poluição atmosférica causada pelos navios de cruzeiro em Lisboa não é significativamente alto para afetar a qualidade do ar na cidade. Com o intuito de reduzir ainda mais o impacto das emissões dos navios de cruzeiro e aumentar a sustentabilidade deste setor turístico, o Porto de Lisboa projetou um sistema OPS de forma a poder fornecer energia elétrica aos paquetes enquanto estes se encontram atracados (APL, 2023f).

5.3. Dados recolhidos e caracterização da amostra

5.3.1. Inspeções a Navios

Os dados recolhidos e utilizados no trabalho a partir de inspeções ambientais feitas aos navios de cruzeiro com escalas no Porto de Lisboa foram a principal fonte de dados. Estas inspeções foram realizadas durante um período de trabalho na APL entre fevereiro e setembro de 2023.

Durante as inspeções foram recolhidos dados relativos às emissões atmosféricas, à gestão de resíduos e das águas de lastro, características dos próprios navios, e as diferentes certificações ambientais. Estes dados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados recolhidos durante as inspeções aos navios de cruzeiro.

Tipologia	Dados	Unidades
Motor	Modelo	N.a
	Potência	kW
	Número de motores em uso	Número
	E, A, S	
	Consumo E, A, S	ton/h
	Loading Factor	%
Características do navio	Altura da chaminé	m
	Diâmetro da Chaminé	Mm
	Gross Tonnage	Ton
Gases de combustão	Temperatura	°C
	Quantidade	m ³
Bunker Delivery Notes	Tipo de combustível	m ³
	Quantidade de enxofre	%
	Densidade	kg/ m ³
	Presença	N.a
Scrubbers	Tipologia do equipamento	N.a
	Tipo de equipamento para redução de NO _x	N.a

na – não aplicável; E - Entrada; A - Atracação; S – Saída

5.3.2. SondarLab

O Porto de Lisboa contratou no período do estudo uma empresa para realizar a monitorização da qualidade do ar na zona de Santa Apolónia (local onde se encontra o Terminal de Cruzeiros de Lisboa). Esta empresa instalou uma estação meteorológica que permite monitorizar a

velocidade e direção do vento, humidade relativa e pressão atmosférica. Para além disso, instalou três estações móveis de monitorização da qualidade do ar (P1, P2 e P3) nos locais sinalizados na Figura 32, que permitem medir a concentração de CO, SO_x, NO_x, PM_{2,5} e PM₁₀.



Figura 32 - Localização das estações utilizadas pela *SondarLab*.

Mensalmente a *SondarLab* elaborou um relatório que englobava os dados recolhidos nas diferentes estações instaladas e as medidas pela rede de sensores da CCDR-LVT (Comissão Coordenadora de Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo) em Lisboa. Na Figura 33 estão representadas as estações utilizadas da *QualAr* que se encontram nos Olivais, Entrecampos, Beato, Restelo e Avenida da Liberdade.



Figura 33 - Localização dos vários sensores em estudo, (Adaptado de Google Earth).

Existem dois tipos de estações distintas, cada uma com o seu objetivo. Estas estações são as estações de tráfego e estações de fundo.

As estações “Avenida da Liberdade” e “Entrecampos” encontram-se em zonas onde existe muito tráfego rodoviário, sendo estas estações de tráfego, que têm o objetivo de medir as concentrações máximas dos poluentes resultantes das emissões do tráfego rodoviário a que a população pode estar exposta. Assim, os valores medidos não são representativos da poluição efetuada pelos navios de cruzeiro, mas sim uma mistura das emissões dos navios e automóveis (APA, 2021f).

As estações “Beato”, “Olivais” e “Restelo” estão localizadas em zonas residenciais onde o tráfego rodoviário é reduzido, sendo estas estações de fundo, que têm o objetivo de avaliar a exposição média da população a concentrações de fundo, ou seja, estas encontram-se localizadas em locais onde não à influência direta de vias de tráfego ou qualquer outra fonte de poluição. Assim optou se por utilizar as medições efetuadas pelas mesmas para o estudo realizado. Porém, as estações “Beato” e “Restelo” são estações que apenas medem a concentração de NO_x , sendo apenas possível avaliar a concentração deste poluente (APA, 2021f).

5.3.3. Outras Fontes de Dados

Foram utilizadas outras fontes de informação para complementar os dados dos relatórios e os recolhidos nas inspeções, de forma que o estudo fosse o mais preciso possível. Estas fontes foram: os comandos da torre da VTS; dados meteorológicos de uma estação localizada na Trafaria; a plataforma de logística do Porto de Lisboa (JUL); fatores de emissão e a plataforma da *Google Earth*.

Os navios ao se aproximarem da entrada deste porto, comunicam com a VTS. Isto permite o registo dos horários exatos de entrada, saída e atracação dos navios, para além dos trajetos que os mesmos realizam dentro da área de jurisdição. Desta forma, foram solicitados estes dados ao comando da torre.

Um dos parâmetros necessários para realizar a dispersão dos poluentes consiste na radiação média. Este parâmetro não era medido pela estação meteorológica da *SondarLab*, pelo que foi utilizada a estação da Trafaria (*Weather Underground*). Esta estação é a mais próxima do Terminal de Cruzeiros de Lisboa (TCL) que realiza a medição deste parâmetro, e que se encontra geograficamente numa zona semelhante à das condições do TCL (junto ao mar).

Em relação à JUL, esta foi utilizada para recolher dados relativos às características gerais dos navios.

Para converter a quantidade de combustível consumido pelos navios, nos caudais dos poluentes emitidos, foram utilizados fatores de emissão. Estes fatores encontram-se representados na Tabela 11.

Tabela 11 - Fatores de emissão para cada tipo de combustível (Adams, 2013; Fontelle *et al.*, 2023).

Poluentes	Fatores de emissão (kg/ton Fuel)			
	MGO	HFO	LNG	HFO + <i>Scrubbers</i>
CO	3,84	3,67	13,8	3,67
NO _x	72,2	69,1	4,92	69,1
SO _x	1,82	19,2	0	1,82
PM _{2,5}	1,4	5,6	0,00106	5,6
PM ₁₀	1,07	5,2	0,00124	5,2

Foi ainda utilizada a plataforma do *Google Earth* de forma a estimar a distância das várias posições do navio em relação aos sensores utilizados neste estudo.

5.3.4. Pressupostos

De forma a aplicar o modelo de dispersão de poluentes, foram considerados os seguintes pressupostos:

- O trajeto dos navios de cruzeiro na área jurídica do Porto de Lisboa representado na Figura 34, foi traçado com informações fornecidas pelos comandos da Torre VTS;
- Dependendo da direção do vento e do posicionamento do navio, alguns sensores podem monitorizar ou não as emissões efetuadas pelos navios de cruzeiro;
- A maior estabilidade atmosférica atingida é de classificação D (Tabela 6);
- Assumiu-se oito direções segundo os pontos cardeais: Norte (N), Nordeste (NE), Noroeste (NO), Este (E), Oeste (O), Sul (S), Sudoeste (SO), Sudeste (SE);
- Os consumos e o tipo de combustível são idênticos em todas as escalas do mesmo navio.



Figura 34 - Trajeto efetuado pelos navios de cruzeiro ao entrarem/saírem da área jurídica do Porto de Lisboa, Adaptado de Google Earth.

A distância dos navios aos sensores foi determinada a partir das coordenadas representadas na Tabela 12.

Tabela 12-Coordenadas dos locais considerados para o estudo. Adaptado de Google Earth.

Locais	Coordenadas	
	Latitude	Longitude
Entrada na área do porto de Lisboa	38° 40' 03" N	009° 18' 44" W
Entrada do piloto	38° 40' 59" N	009° 13' 48 " W
Cabeço 1	38° 42' 32 " N	009° 07' 32 " W
Cabeço 2	38° 42' 39" N	009° 07' 24" W
Cabeço 3	38° 42' 49" N	009° 07' 13" W
Cabeço 4	38° 42' 57" N	009° 07' 06" W
P1	38° 42' 31,78" N	009° 7' 55,01" W
P2	38° 42' 44,88" N	009° 7' 30,65" W
P3	38° 42' 58,23" N	009° 7' 15,94" W
Estação física	38° 42' 33,96" N	009° 7' 36,76" W
Avenida da Liberdade	38° 43' 16" N	009° 08' 46" W
Entrecampos	38° 44' 54" N	009° 08' 56" W
Beato	38° 44' 01" N	009° 06' 52" W
Olivais	38° 46' 11" N	009° 06' 26" W
Restelo	38° 42' 20" N	009° 12' 34" W

5.3.5. Caracterização da amostra

Durante o período abrangido por este trabalho ocorreram 222 escalas as quais foram efetuadas por 109 navios diferentes. Destes 109 navios foram inspecionados 47 (43%), aplicando o pressuposto de que certos navios possuem *sister ships* (navios idênticos), foram cobertos no total 64% dos navios que passaram pelo Porto de Lisboa. Por sua vez, foram cobertas 174 escalas das 222 realizadas no Porto de Lisboa, sendo este valor equivalente a 78%. Assim, avaliando a representatividade da amostra através do número de escalas cobertas, esta possui um nível de confiança de 99% com uma margem de erro de 5%.

Na Figura 35 encontra-se representada a afluência semanal de navios de cruzeiro durante o período de estágio e a quantidade de navios inspecionados.

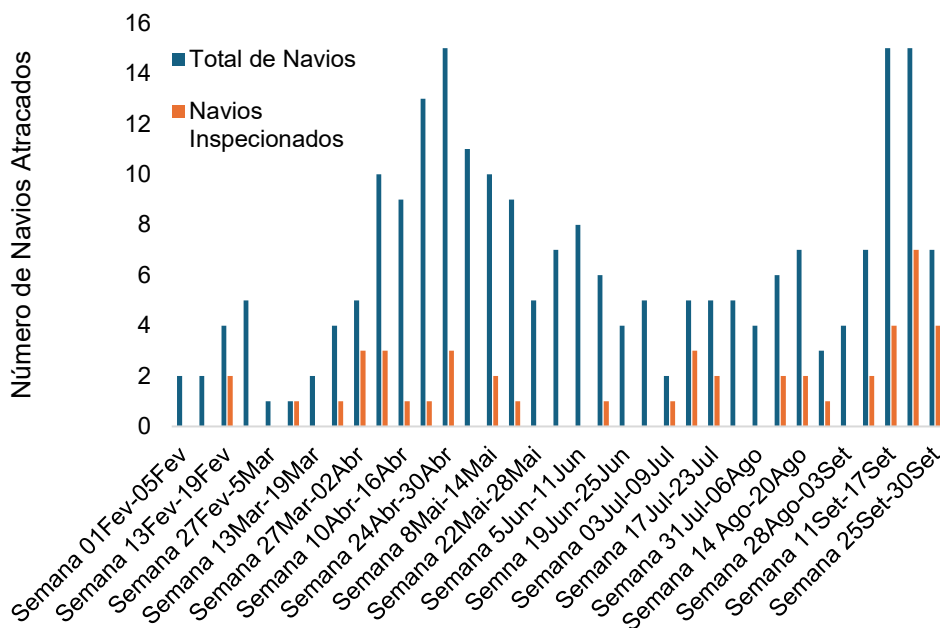


Figura 35 - Número de total de navios que passaram pelo porto de Lisboa e número de navios inspeccionados entre fevereiro e setembro.

De fevereiro a setembro passaram diversos navios pelo Porto de Lisboa, sendo que alguns fizeram várias escalas enquanto outros apenas realizaram uma. Quanto mais escalas um navio realiza maior a importância do mesmo para avaliar o seu impacto na qualidade do ar. Na Figura 36 encontra-se representado o número de navios totais e inspeccionados tendo em conta o número de escalas que realizaram.

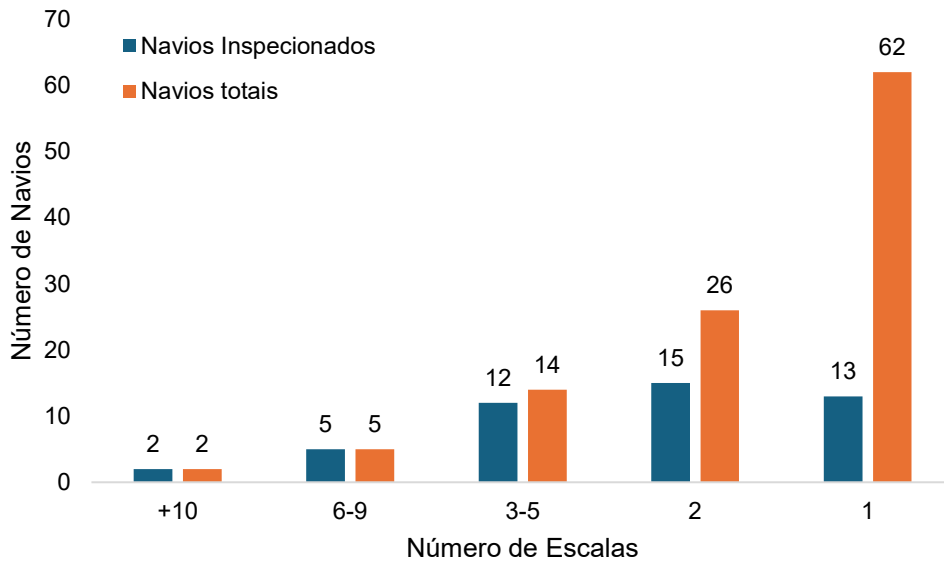


Figura 36 - Relação dos navios inspeccionados e a quantidade de escalas que os mesmos realizaram.

Como se pode notar na Figura 36, a maioria dos navios apenas realizou uma escala em Lisboa durante o período do estudo, um total de 62, dos quais foram inspeccionados 13. Quanto aos navios que realizaram duas escalas o número desce drasticamente para os 26 navios, dos quais foram inspeccionados 15. Como referido anteriormente, quanto maior o número de escalas, maior a sua importância, pelo que foram inspeccionados quase na totalidade os navios com mais de três escalas. O *MSC Orchestra* e o *Ventura* foram os únicos navios que passaram por Lisboa mais de dez vezes.

Dos navios inspeccionados verificou-se também o horário de chegada dos mesmos ao Porto de Lisboa, pelo que 40 dos 47 navios inspeccionados chegaram entre as 6 e as 9 da manhã e 35 dos 47 navios inspeccionados partiram entre as 15-21, como se encontra representado na Figura 37.

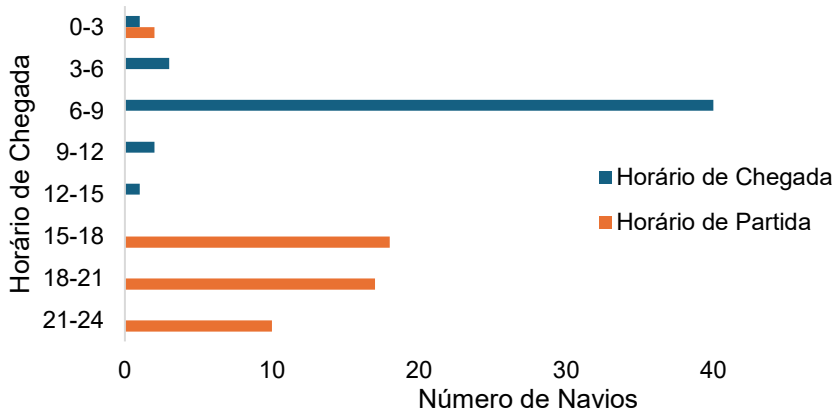


Figura 37 - Horários de chegada dos navios ao terminal de cruzeiros de Lisboa.

5.3.6. Características dos navios inspecionados

De forma a realizar a caracterização dos navios inspecionados começou-se por avaliar a dimensão dos mesmos. A dimensão dos navios é avaliada através do GT. Quanto maior o GT, maior o consumo de combustível, e por sua vez maior a emissão de poluentes associado ao navio. Assim, na Figura 38 encontra-se representado a dimensão dos navios inspecionados.

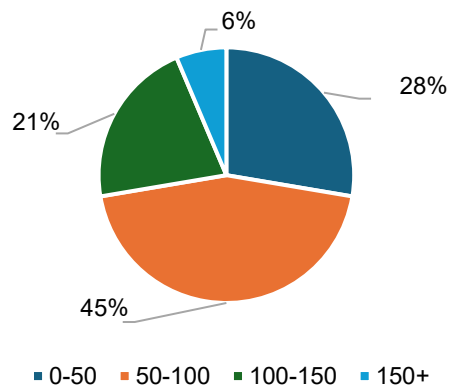


Figura 38 - Frequência de tonelage dos navios inspecionados.

Maior parte dos navios inspecionados, cerca de 45%, possuem dimensões intermédias (entre 50 a 100 GT), 28% são de médio-grande porte (entre 100-150 GT), 6% representam navios de grandes dimensões (mais de 150 GT) e 28% de pequenas dimensões (até 50 GT).

Também se verificou a relação entre o tipo de combustível escolhido pelos navios e as suas dimensões. Os navios que utilizam HFO têm um peso médio de 103 GT, os que optam por MGO têm um peso médio de 73 GT e, por fim, os que utilizam LNG têm um peso médio de 120 GT. Assim, denota-se que navios de maiores dimensões optam por utilizar HFO como o principal combustível, enquanto navios de porte pequeno e médio porte optam por utilizar MGO. Foram apenas inspecionados dois navios que utilizaram LNG sendo que estes foram o *IONA* (185 GT) e o *Silver Nova* (55 GT), pelo que tanto navios de grande porte como navios de pequeno porte optam por este combustível. Estes dados encontram-se representados na Figura 39.

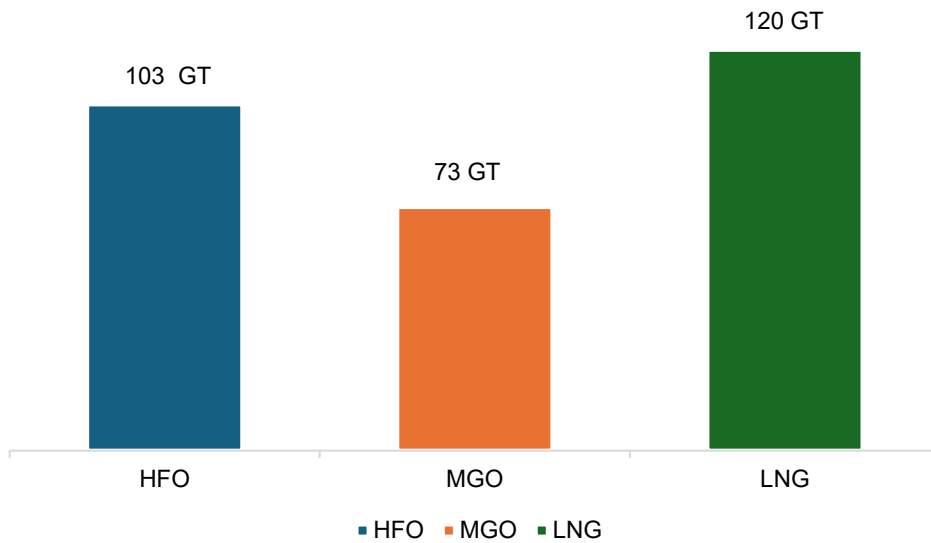


Figura 39 - Relação entre o GT médio dos navios com o combustível utilizado.

Seguidamente relacionou-se o número de navios inspecionados com o combustível que estes utilizam, estando estes dados representados na figura 40.

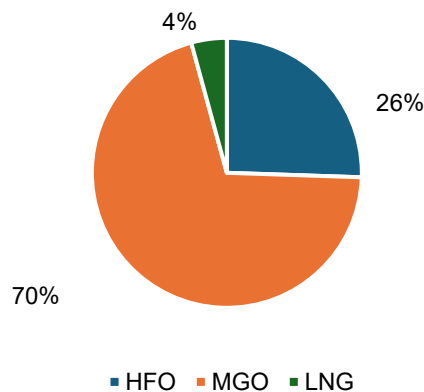


Figura 40 - Relação entre os navios inspecionados e o tipo de combustível que estes usam.

Através da análise da Figura 40 verifica-se, que grande parte dos navios de cruzeiro inspecionados (cerca de 70%) utilizam MGO enquanto se encontravam atracados. O segundo combustível mais utilizado foi o HFO (cerca de 26%) sendo que os mesmos utilizaram sempre *scrubbers* em *close loop* enquanto se encontravam atracados. Por fim, o combustível menos utilizado foi o LNG, tendo representado apenas 4% dos navios inspecionados.

Seguidamente analisou-se os consumos de cada combustível tendo em conta a manobra que o navio pode efetuar. Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 41.

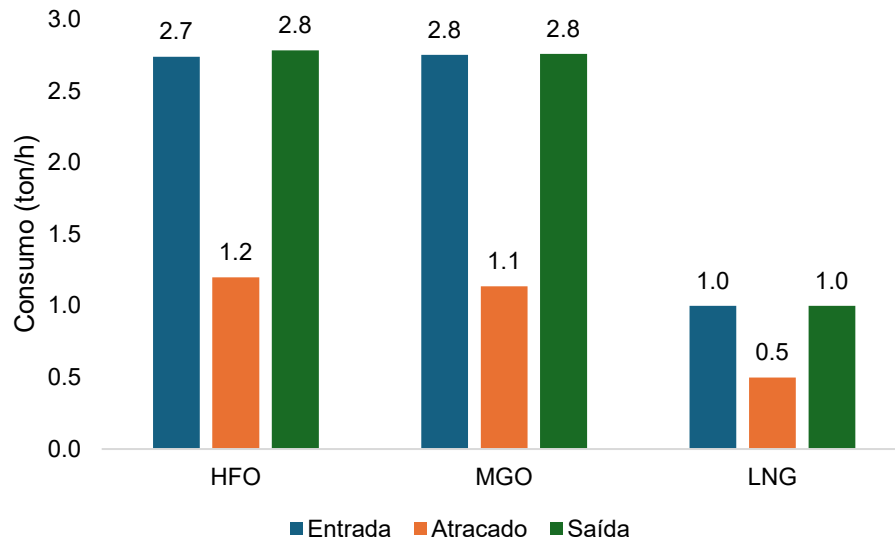


Figura 41 - Consumos médios (ton/h) dos navios de cruzeiro para cada tipo de combustível.

Através da Figura 41, verifica-se que os combustíveis que apresentam consumos mais elevados são o HFO e o MGO, enquanto o LNG foi aquele que apresentou os consumos mais baixos. Como era esperado os movimentos que apresentam consumos mais elevados em todos os tipos de combustível são a entrada e saída dos navios de porto. Estes consumos devem-se às manobras que o navio necessita de efetuar para sair de porto que por sua vez utilizam vários equipamentos a bordo, como motores auxiliares e *thrusters* que aumentam o consumo de combustível

Por fim, foi utilizada o *GT* médio e os consumos, de modo a determinar quanto é que os navios consomem por tonelada. Utilizou-se os consumos anteriormente referidos (durante a entrada, atracados e saída), tendo sido obtida a Figura 42.

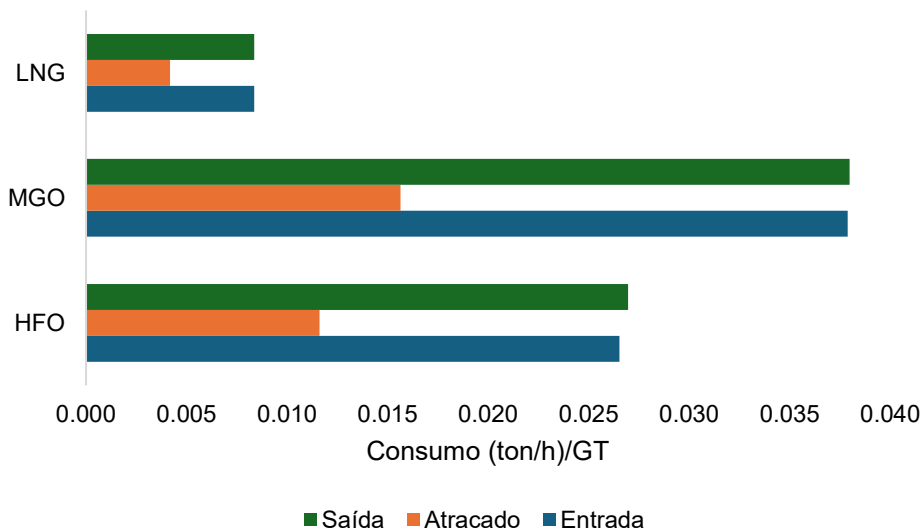


Figura 42 - Consumo médio dos combustíveis por tonelada de navio para cada tipo de combustível na entrada, saída e atracação.

Verificou-se assim que os navios que mais combustível consomem, estando atracados ou a realizar manobras, são os navios que optam por consumir MGO, seguidos pelos navios a HFO. Os navios que menos combustível consome são os navios movidos a LNG.

Por fim relacionou-se os consumos apresentados na Figura 42 com os fatores de emissão da Tabela 11, de forma a obter-se a relação do tipo de combustível com o caudal de poluentes emitidos por tonelada de navio. Esta relação encontra-se representada na Figura 43.

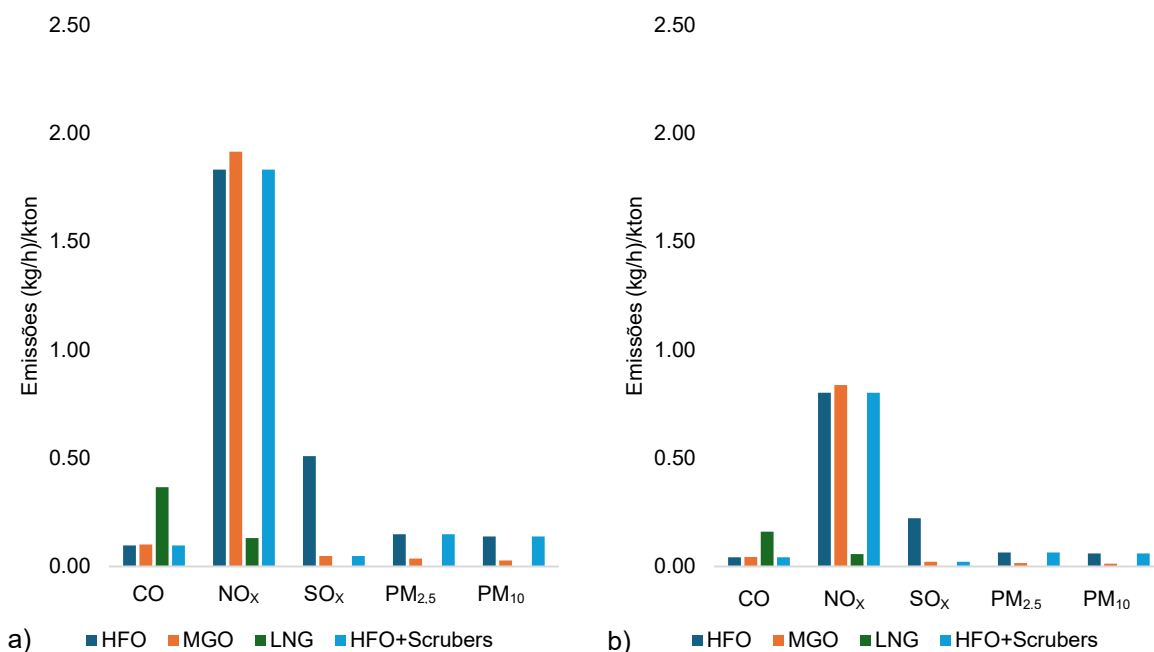


Figura 43 - a) Caudal de emissão dos poluentes por tonelada de navio durante as manobras, b) Caudal de emissão dos poluentes por tonelada de navio enquanto atracado.

Quanto à presença de *scrubbers*, verificou-se que 53% dos navios inspecionados encontravam-se providos deste equipamento. Destes, 48% encontravam-se equipados com *scrubbers open loop*, pelo que necessitaram de realizar a troca de combustível ao aproximarem-se do porto, pois devido às políticas aplicadas na atracação do porto de Lisboa, não são permitidas nenhum tipo de descargas enquanto o mesmo se encontrar dentro da área de jurisdição. Ou seja, em porto estes navios utilizam MGO e em alto mar geralmente trocam para HFO. Outros 48% dos navios inspecionados apresentavam *scrubbers* em *close loop*, pelo que em porto podiam utilizar HFO como combustível e apenas 4% apresentavam *scrubbers* híbridos os quais podiam optar tanto por utilizar HFO, caso optassem pelo funcionamento em *close loop* ou por MGO caso não pretendessem ter o equipamento a trabalhar.

Capítulo 6

Resultados e Discussão

6.1. Tratamento dos dados

Para se determinar o impacto dos cruzeiros na qualidade do ar na área de influência da TCL, foi necessário realizar o tratamento dos vários dados recolhidos através da sua correlação e também através de simulação usando um modelo de dispersão de poluentes.

A primeira etapa foi correlacionar os dados recolhidos relativos aos consumos dos navios e a dimensão dos mesmos com a concentração dos vários poluentes em todas as estações meteorológicas, considerando a direção do vento de forma a prever-se a leitura (ou não) dos dados.

Por fim, aplicou-se o modelo de dispersão de poluentes de forma a validar o modelo e verificar quanto das emissões dos navios é que realmente correspondem ao que está a ser lido pelos sensores.

6.1.1. Correlação dos dados recolhidos

Os poluentes monitorizados nas diversas estações da *SondarLab* nos vários meses representados foram correlacionados com a tonelagem (GT) (Figura 44 a e nos Anexos I-XXIV) e com os consumos de navios em porto (Figura 44 b e nos Anexos I-XXIV). A Figura 44 a e b representa a variação do monóxido de carbono da “Estação-Física” para o poluente CO durante o mês de junho.

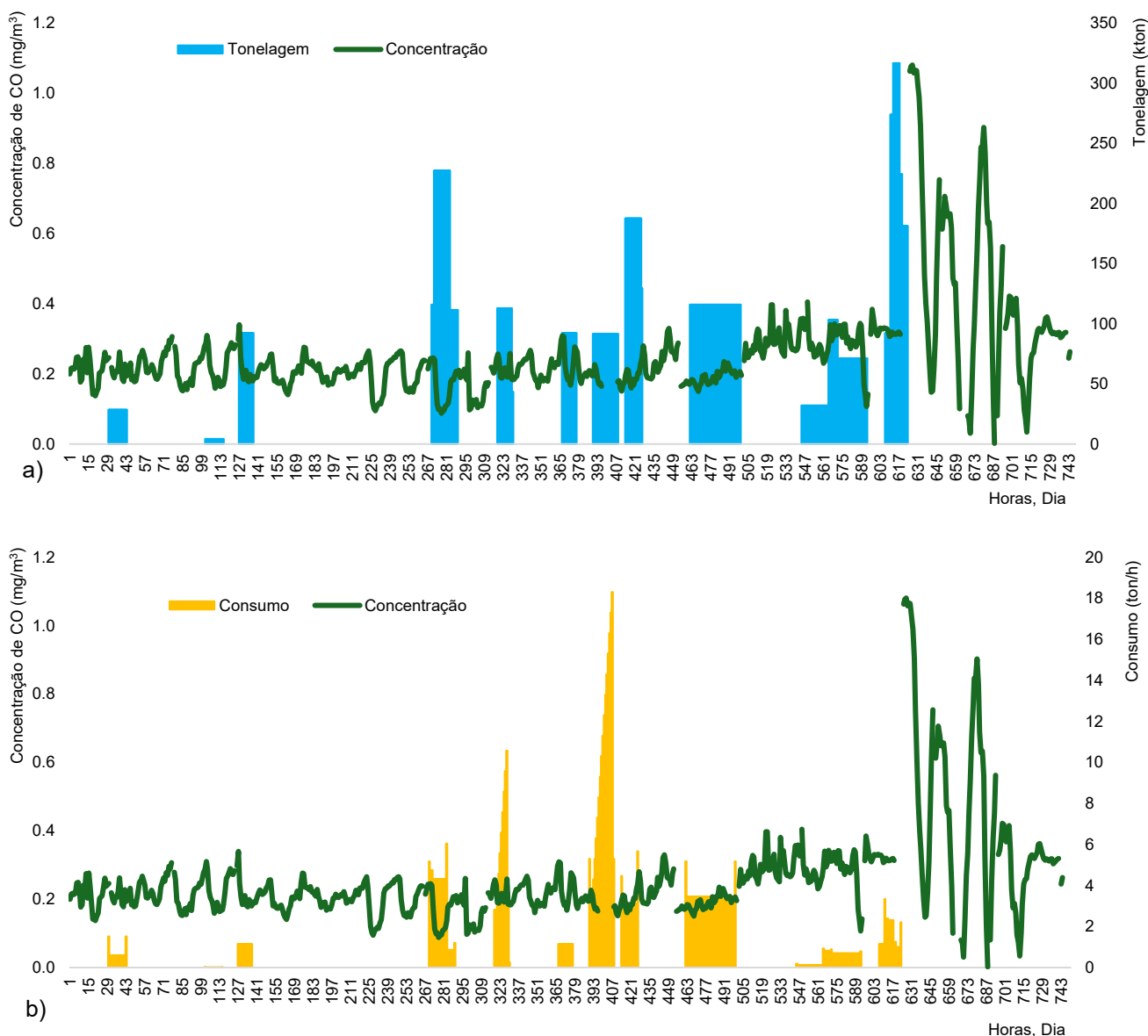


Figura 44 – Variação da concentração de CO ao longo do mês de julho tendo em conta **a)** Tonelagem dos navios, **b)** Consumo dos navios.

Para uma melhor análise dos resultados apresentados na Figura 44, fez uma aproximação entre as 350 h e 500 h. Os resultados encontram-se representados na Figura 45.

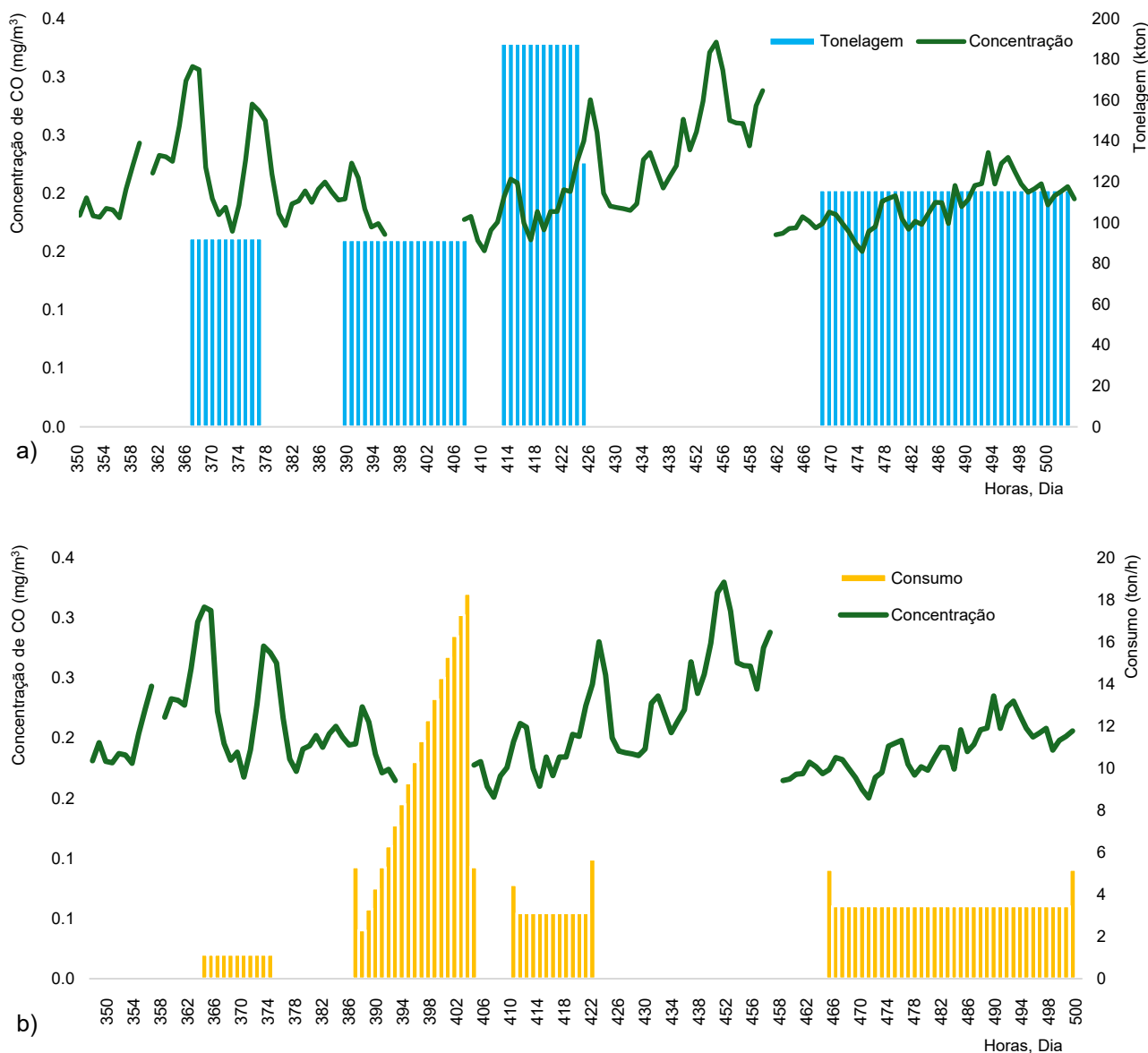


Figura 45 - Variação da concentração de CO ao longo do mês de julho tendo em conta **a)** Tonelagem dos navios, **b)** Consumo dos navios.

Através das Figura 44 e 45 não é possível atribuir diretamente a poluição causada pelos navios aos picos de concentração de poluentes, dado que em muitas das situações verificou-se a presença de vários navios e consumos elevados de combustível, e por sua vez níveis de concentração de poluentes baixos. Por outro lado, sem a presença de nenhum navio, verificou-se também que picos de concentração do CO atingiram os valores máximos de 1,1 mg/m³ de concentração. No que se toca aos restantes meses (Anexos I-XXIV) verifica-se o mesmo efeito, em momentos que diversos navios se encontram atracados em porto, a concentração dos poluentes atinge valores mínimos e em momentos em que não existem navios os valores dos diferente poluentes atingem valores máximos. Assim, não é possível correlacionar o aumento da concentração

destes poluentes com a presença dos navios, pois estes também apresentaram picos máximos de concentração em dias que não havia nenhum navio atracado em porto.

Ainda assim, alguns poluentes ultrapassaram os valores limites da UE e os valores guia da OMS, enquanto outros cumpriram ambos os parâmetros. Assim da análise do mês de julho e dos restantes meses verifica-se que:

- A concentração de CO esteve abaixo dos valores limites nacionais e europeus e também das recomendações da OMS, apresentando valores inferiores a $1,2 \text{ mg/m}^3$ no mês de julho, verificando-se o mesmo para os restantes meses.
- A concentração de NO_x apresentou, no mês de julho, diversos picos superiores aos valores exigidos pela UE e pela OMS, atingindo valores de $130 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ quando o valor limite é de $45 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Ainda assim os meses onde foram verificados os picos de concentração mais elevados para este poluente foram os meses de fevereiro e abril, tendo se verificado picos de 450 e $350 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, respetivamente.
- A concentração de SO_x cumpriu com as exigências nacionais, europeias e segundo as recomendações da OMS, apresentando sempre valores inferiores a $40 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ no mês de julho e nos restantes meses.
- A concentração de PM_{10} esteve abaixo dos valores limites nacionais e europeus e também das recomendações da OMS, apresentando valores inferiores a $45 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ na maioria dos meses tratados.
- A concentração de $\text{PM}_{2,5}$ apresentou diversas vezes picos superiores aos valores exigidos pela UE e pela OMS, atingindo valores perto de $30 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, no mês de julho, sendo que os meses que apresentaram os valores mais elevados para este poluente foi o mês de fevereiro e abril.

Foi ainda verificado se seria possível identificar uma tendência do aumento de concentração dos poluentes, com o aumento do consumo de combustível correlacionando a concentração de um determinado poluente com o consumo (Figura 46 e Anexos XXV - XLVIII). A Figura 46 representa os resultados obtidos para a variação da concentração do monóxido de carbono na “Estação Física” no mês de julho.

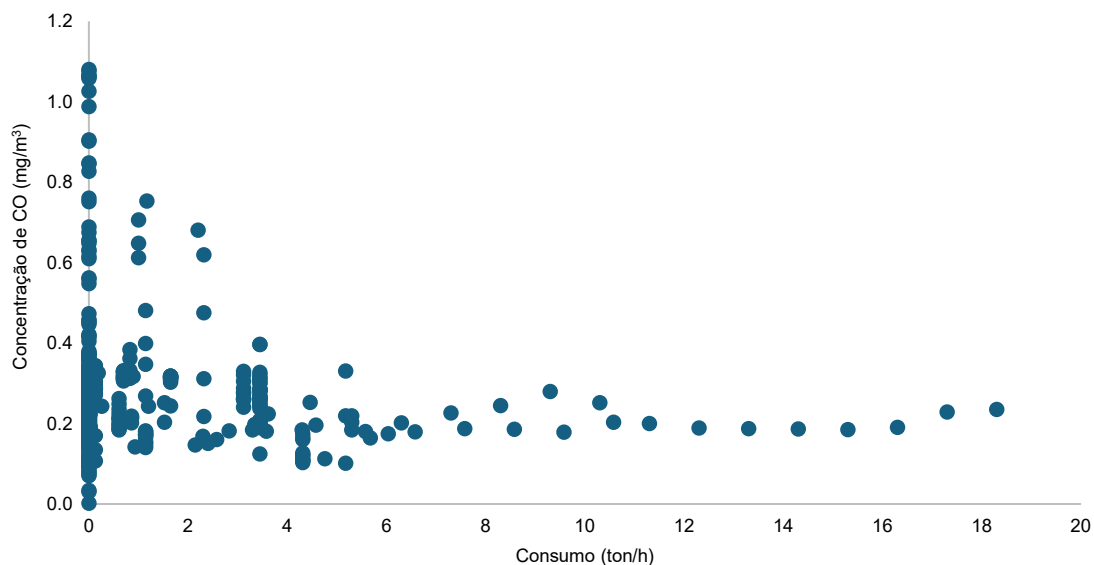


Figura 46 - Relação entre a concentração do poluente CO e o consumo de combustível.

Através da análise da Figura 46 e das Figuras presentes nos Anexos XXIV-XLIX não foi possível verificar-se uma tendência do aumento da concentração dos poluentes com o aumento do consumo de combustível. Pelo que, desta forma não é possível verificar-se que a concentração dos poluentes tenha uma relação direta com a poluição efetuada pelos navios de cruzeiro.

6.2.2. Poluição média

De forma a verificar o impacto da poluição dos navios de cruzeiro na área metropolitana de Lisboa representou-se as médias horárias da concentração de cada poluente em função do tempo para cada sensor.

Sabendo que os fatores que influenciam a qualidade do ar da cidade de Lisboa são diversos, existem outras fontes emissoras de poluentes para além dos navios de cruzeiros. Analisou-se a variação da concentração dos poluentes para diferentes situações:

- Dias de semana com e sem paquetes;
- Dias de fim de semana com e sem paquetes;

As variações da concentração média horária dos vários poluentes nos dias de semana na “Estação Física” durante o mês de julho encontram-se representados na Figura 47.

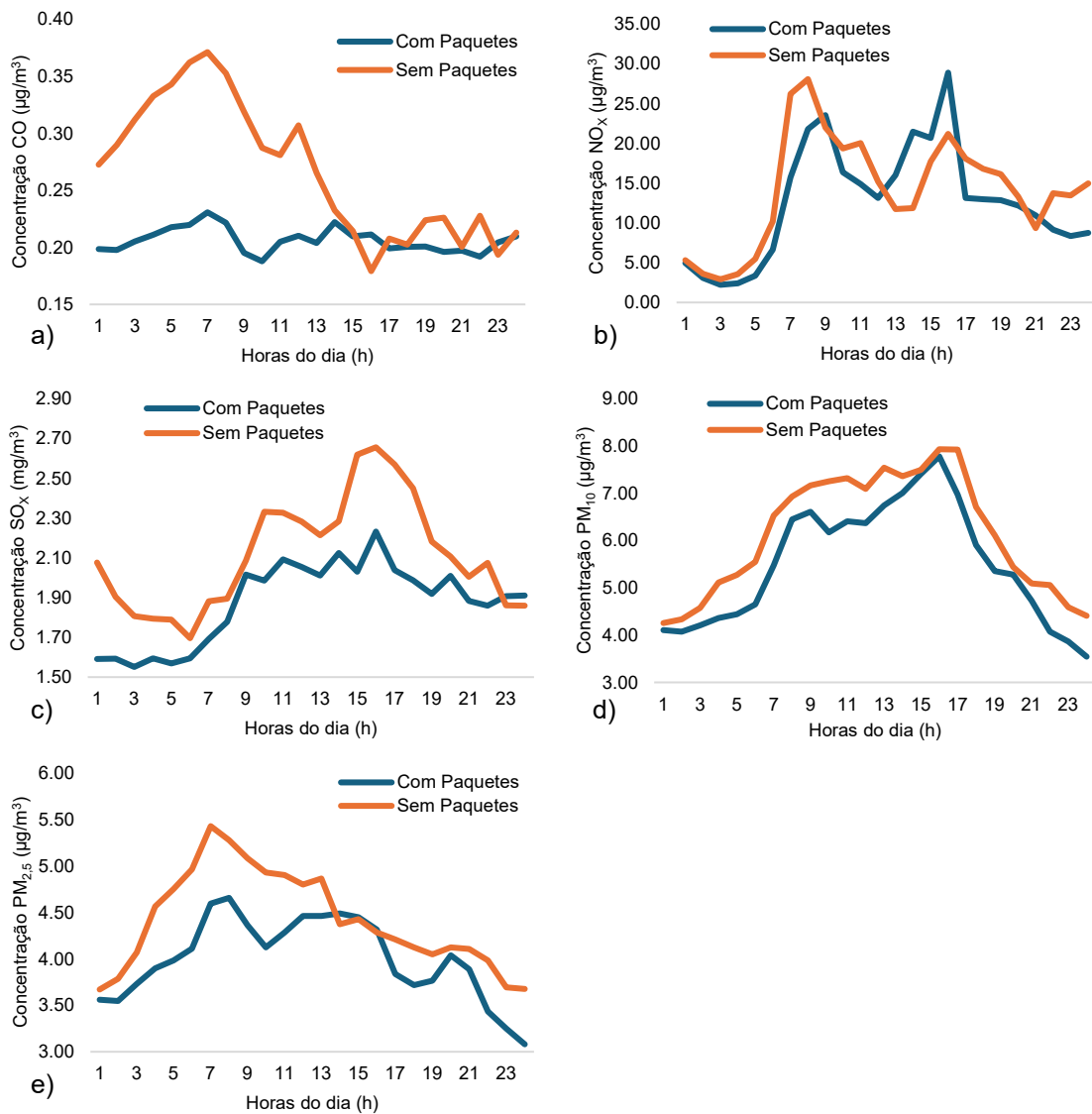


Figura 47 – Concentração média diária nos dias de semana, medidos pelo sensor "Estação Física" da *SondarLab* ao longo do mês de julho: a) CO; b) NO_x; c) SO_x; d) PM₁₀; e) PM_{2.5}.

Para as restantes estações e situações temporais, as variações da concentração média horária dos vários poluentes nos dias de semana encontram-se representados nos Anexos LXIX-LXXI.

- O poluente CO apresentou valores de concentração médios inferiores aos valores limites nacionais e europeus e também das recomendações da OMS.
- Os valores médios de NO_x ao longo dos meses foi maioritariamente inferior ao valor limite exigido pela UE, atingindo apenas valores superiores a 50 µg/m³ no mês de fevereiro e no mês de abril. Quanto às recomendações da OMS para os restantes meses os valores médios deste poluente foram quase sempre superiores ao valor guia recomendado, atingindo concentrações superiores a 25 µg/m³.

- A concentração de SO_x cumpriu com as exigências nacionais, europeias e segundo as recomendações da OMS, apresentando durante maior parte do tempo valores inferiores a 7 µg/m³ (sendo o valor guia da OMS 40 µg/m³).
- Quanto ao poluente PM₁₀, a concentração média cumpriu com a legislação europeia e com as recomendações da OMS no mês julho. Nos restantes meses este apresentou concentrações mais elevadas no mês de fevereiro e no mês de abril. Durante a maioria do tempo este poluente apresentou concentrações inferiores às recomendações da OMS para um período de exposição de 24 h, contudo apresentou valores superiores para o valor guia anual.
- Os valores médios do poluente de PM_{2,5} ao longo dos meses de julho foi inferior a 15 µg/m³ (valor máximo recomendado pela OMS num período de 24h). Porém, para os restantes meses a concentração média deste poluente foi superior à recomendação anual da OMS (5 µg/m³), atingindo os valores mais elevados no mês de fevereiro e abril.

Através da análise da Figura 47 e dos Anexos LXIX-LXXI verifica-se que em muitos dos casos os dias sem paquetes apresentam concentrações dos poluentes superiores aos dias com paquetes. No entanto, é possível observar alguns picos de concentração nos poluentes NO_x , SO_x e partículas no período horário em que geralmente os navios chegam e saem de porto.

As variações da concentração média horária dos vários poluentes nos dias de fim de semana na “Estação Física” durante o mês de julho encontram-se representados nas Figuras 48.

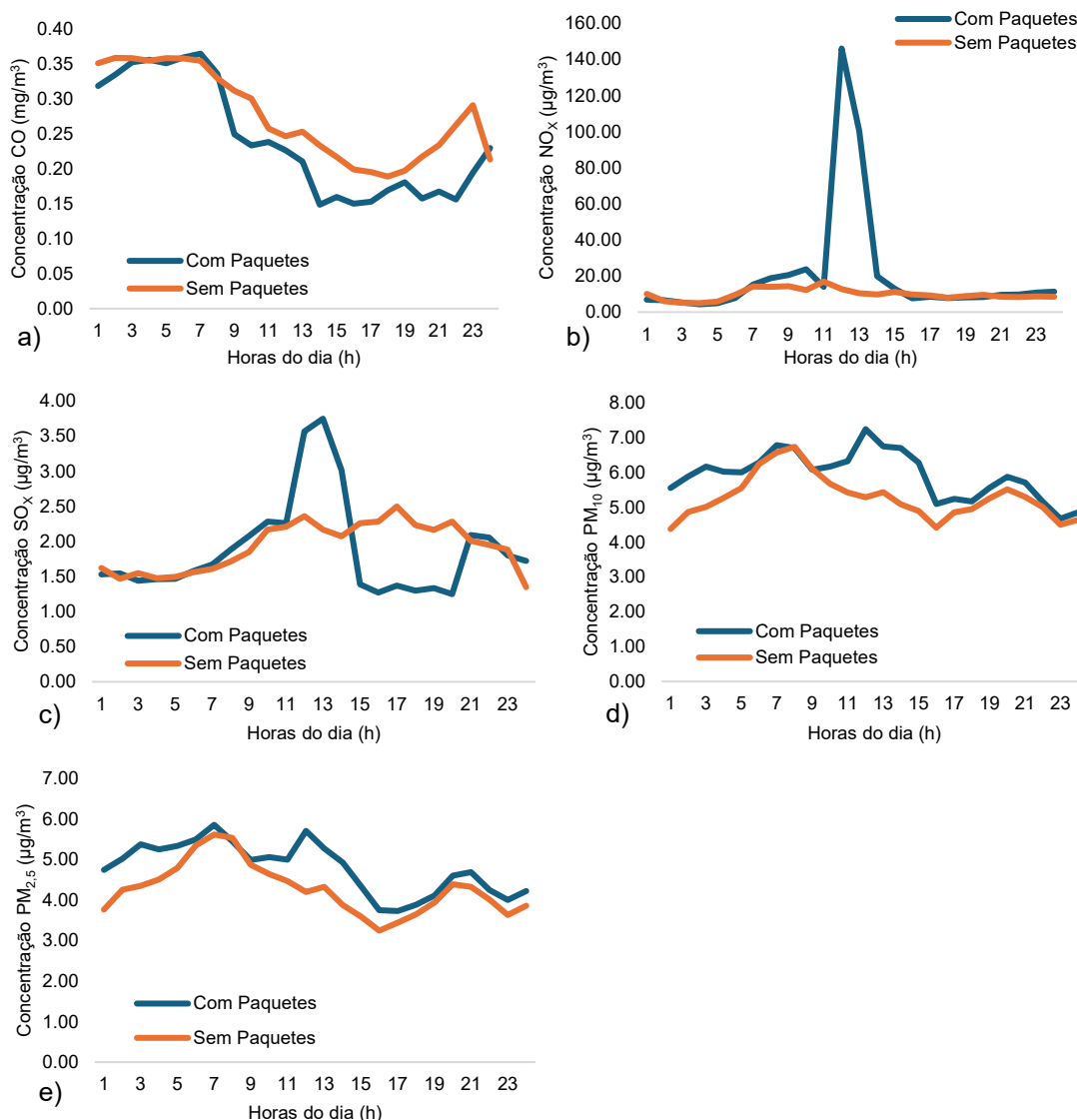


Figura 48- Concentração média diária nos dias de fim de semana, medidos pelo sensor "Estação Física" da *SondarLab* ao longo do mês de julho: **a)** CO; **b)** NO_x ; **c)** SO_x ; **d)** PM_{10} ; **e)** $\text{PM}_{2.5}$.

Para os restantes meses tratados, as variações da concentração média horária dos vários poluentes nos dias de fim de semana encontram-se representados nos Anexos LXXII-XCIII.

Ao analisar a Figura 48 e os Anexos LXXII-XCIII, verifica-se que nos dias de fim de semana a influência das emissões dos navios de cruzeiro é maior nos valores monitorizados comparando com dias sem a presença de navios. Esta influência é especialmente notável em certos poluentes como o SO_x e NO_x , sendo estes os poluentes com maior importância de controlo na indústria naval.

Contudo, no que se toca aos restantes poluentes verifica-se que estes não sofrem aumentos significativos com a presença dos navios de cruzeiro não afetando o nível da qualidade do ar em Lisboa.

Verificou-se de seguida a influência da poluição causada pelos navios de cruzeiro em dias de semana específicos com e sem paquetes para as estações “Olivais”, “Beato” e “Restelo”. Para tal, foram escolhidos seis dias com a temperatura, direção e velocidade do vento semelhantes e com o mesmo dia da semana equivalente (terça, quarta e quinta-feira), com e sem navios presentes. Optou-se por utilizar o mês de julho pois o mesmo não teve grandes variações nas condições meteorológicas e foi possível cumprir com os requisitos mencionados anteriormente.

Os resultados encontram-se representados nas Figuras 49-53.

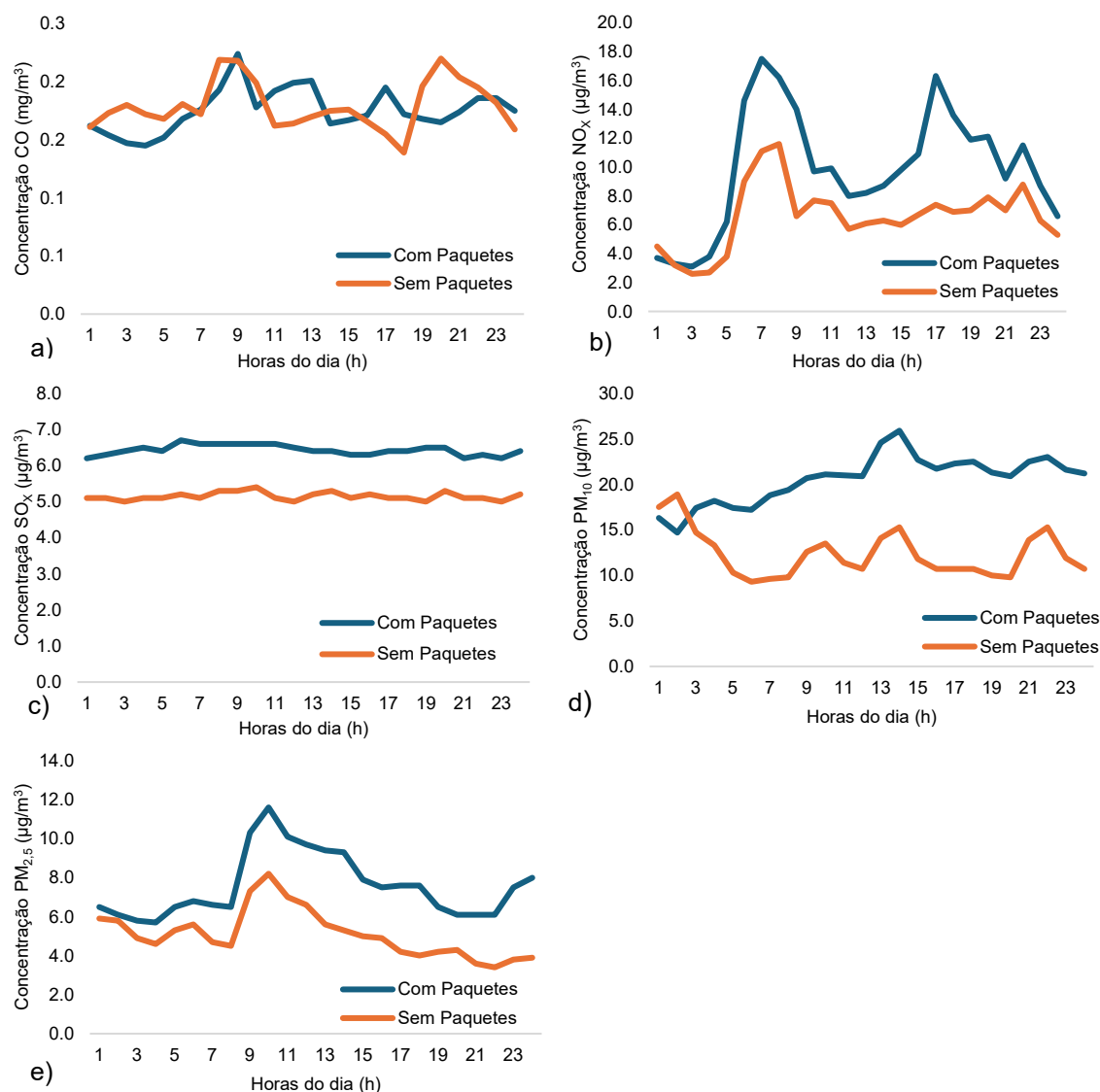


Figura 49 - Resultado da estação de monitorização dos "Olivais" numa terça-feira, com e sem paquetes, **a)** CO, **b)** NO_x, **c)** SO_x, **d)** PM₁₀, **e)** PM_{2,5}.

Relativamente ao sensor dos “Olivais”, ao analisar a Figura 49, verifica-se que no dia de semana de terça-feira, com a presença de paquetes, a concentração média dos poluentes (com a exceção do CO) foram significativamente mais elevados em relação ao dia em que não houve paquetes. É possível verificar-se também um padrão comum em todos os poluentes. No horário típico de chegada, verifica-se um aumento da concentração de todos os poluentes. Por outro lado, no gráfico relativo ao NO_x, verifica-se também um pico de concentração no horário de partida dos navios, mostrando o impacto que estes têm na qualidade do ar na cidade de Lisboa.

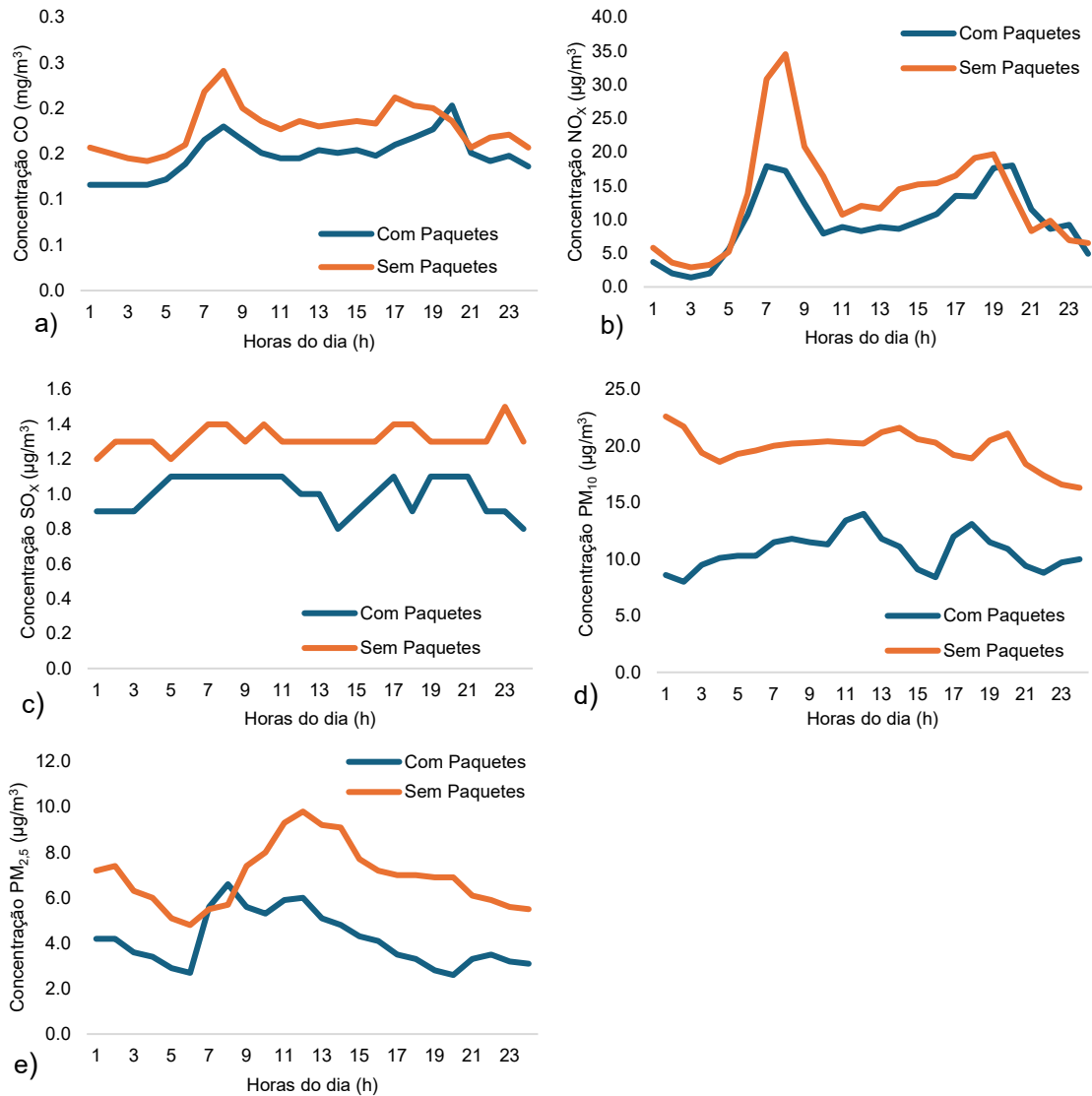


Figura 50 - Resultado da estação de monitorização dos "Olivais" numa quarta-feira, com e sem paquetes, **a)** CO, **b)** NO_x, **c)** SO_x, **d)** PM₁₀, **e)** PM_{2.5}.

Através da Figura 50, verifica-se um comportamento diferente dos resultados observados na Figura 49. Demonstrou-se que no dia de semana de quarta-feira, no sensor dos “Olivais”, sem paquetes, as concentrações dos poluentes foram ligeiramente superiores em comparação ao dia com paquetes. Foi possível observar-se um pico na concentração dos poluentes CO, NO_x e partículas no horário de chegada, contudo todos os picos rapidamente caíram para valores inferiores ao dia sem paquetes.

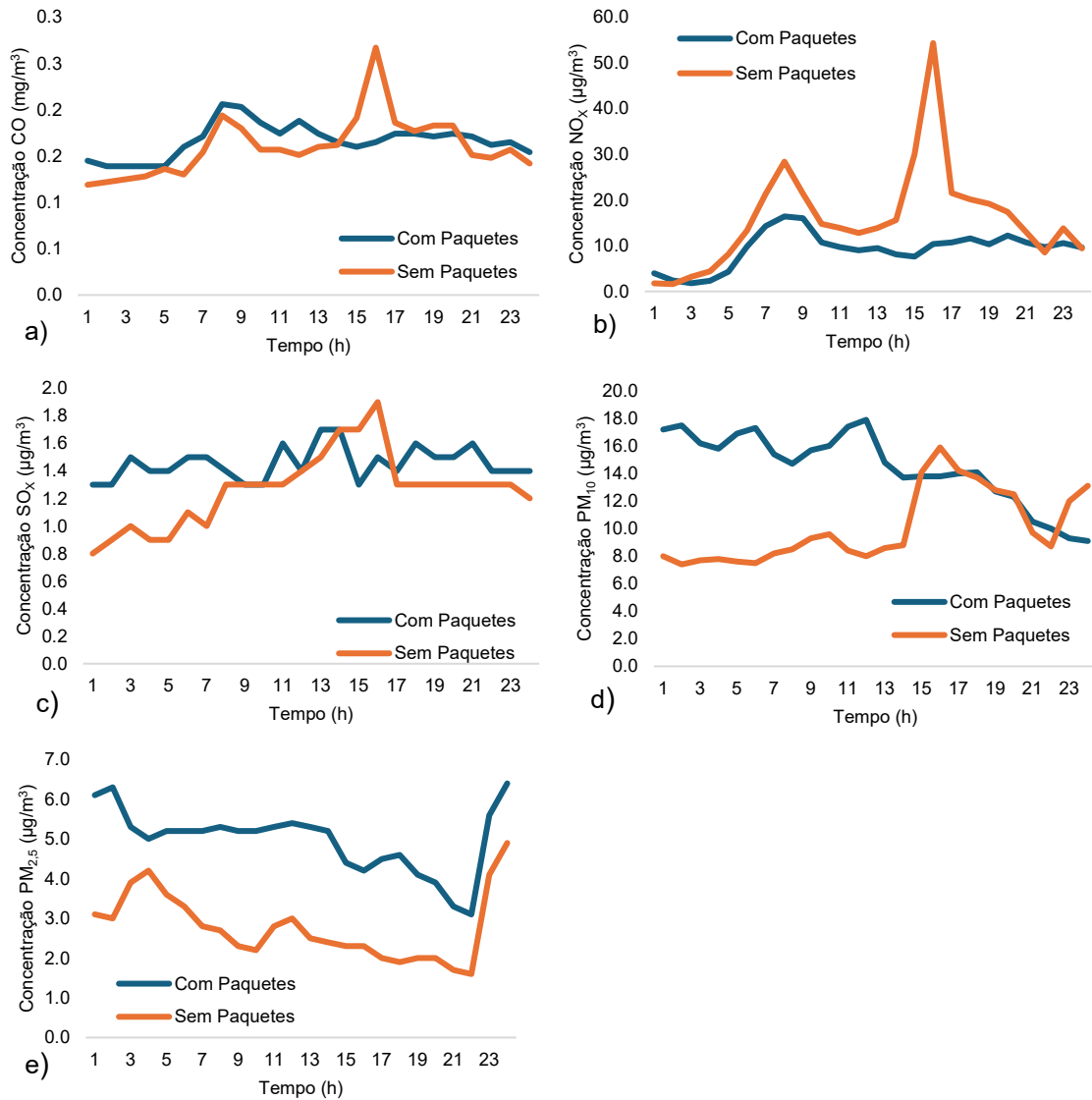


Figura 51 - Resultado da estação de monitorização dos "Olivais" numa quinta-feira, com e sem paquetes, **a)** CO, **b)** NO_x, **c)** SO_x, **d)** PM₁₀, **e)** PM_{2,5}.

Relativamente ao dia de semana quinta-feira representado na Figura 51, denota-se que, no sensor dos "Olivais", alguns dos poluentes apresentam concentrações ligeiramente superiores num dia com paquetes em comparação com o dia sem paquetes. Esta influência é especialmente notável no gráfico relativo ao poluente PM₁₀. Contudo, no gráfico relativo ao NO_x, existem dois picos elevados ao contrário do dia sem paquetes pelo que não é possível afirmar a influência dos navios neste dia.

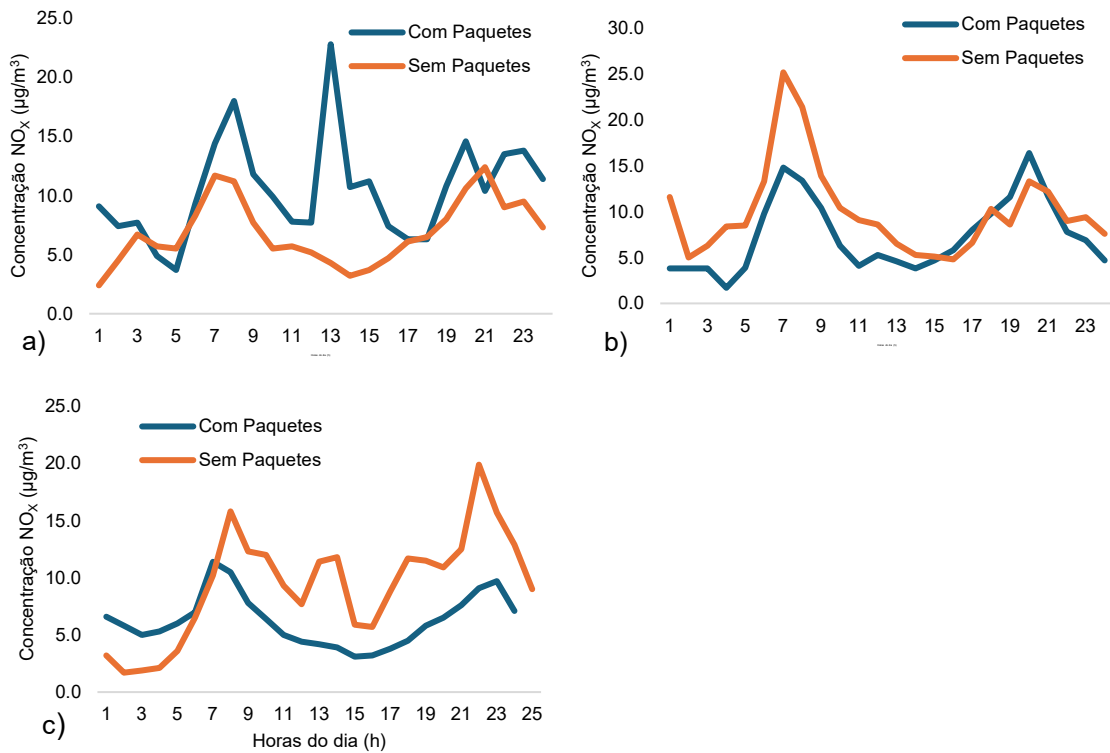


Figura 52 - Resultado da estação de monitorização do "Restelo" relativamente ao poluente NO_x, a) Terça-Feira, b) Quarta-Feira, c) Quinta-Feira.

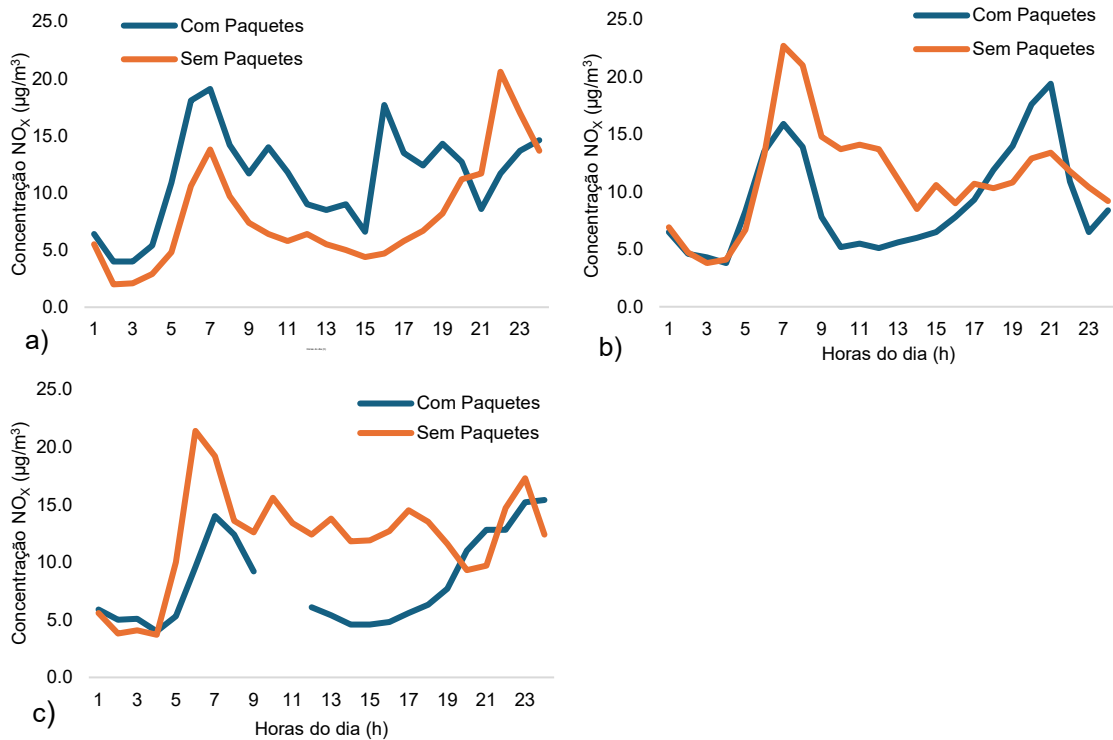


Figura 53 - Resultado da estação de monitorização do "Beato" relativamente ao poluente NO_x, a) Terça-Feira, b) Quarta-Feira, c) Quinta-Feira.

Analisando as Figura 52 e 53 verifica-se que nos sensores “Restelo” e “Beato”, na terça-feira, a concentração do poluente NO_x foi superior no dia com paquetes, em relação ao dia sem paquetes, tal como se verificou nos gráficos, do mesmo dia, no sensor dos “Olivais”. Porém, tanto na quarta-feira como na quinta-feira, apenas se verifica picos de concentração nos horários típicos de chegada e saída dos navios, o que, por outro lado, correspondem também ao horário onde geralmente existe maior afluência de veículos na cidade de Lisboa, pelo que, não é possível verificar-se uma influência direta dos navios de cruzeiro na concentração dos poluentes.

Quanto ao cumprimento da legislação e das recomendações da OMS, verifica-se o seguinte:

- Com a exceção do poluente NO_x todos os poluentes apresentaram concentrações inferiores aos valores limite da legislação nacional e dos valores guia da OMS.
- O NO_x, apenas apresentou valores superiores (atingindo 35 e 50 µg/m³) na quarta e quinta-feira.
- Embora que os valores recomendados pela OMS, para o período diário, tenham sido cumpridos, caso estes poluentes mantivessem as concentrações apresentadas o resto do ano, os valores médio para as partículas e NO_x, seriam superiores às recomendações da OMS para um período anual.

6.2.3. Previsões de Leitura

Um dos fatores mais importantes para a avaliação do impacto da poluição dos navios de cruzeiro na área metropolitana de Lisboa é a direção do vento, pois caso a direção do vento não seja favorável a nenhum sensor, este não irá detetar a poluição emitida pelos navios.

Desta forma, verificou-se a gama de direções que o vento pode adotar tendo em conta as diversas posições dos sensores. Através dos dados recolhidos na “Estação Física” da *SondarLab*, verificou-se em que dias é previsto haver a influência das emissões dos navios de cruzeiro. Estes dados são representados na Tabela 13.

Tabela 13 - Previsão da deteção das emissões dos navios de cruzeiro, pelas estações de monitorização do ar em julho.

Dia	Probabilidade de deteção	Presença de Navios	Dia	Probabilidade de deteção	Presença de Navios
1	Sim	Sem Navios	17	Sim	Com Navios
2	Sim	Com Navios	18	Sim	Com Navios
3	Não	Sem Navios	19	Sim	Sem Navios
4	Não	Sem Navios	20	Sim	Com Navios
5	Sim	Com Navios	21	Sim	Com Navios
6	Não	Com Navios	22	Sim	Sem Navios
7	Sim	Sem Navios	23	Sim	Com Navios
8	Sim	Sem Navios	24	Sim	Com Navios
9	Sim	Sem Navios	25	Não	Sem Navios
10	Sim	Sem Navios	26	Não	Com Navios
11	Sim	Sem Navios	27	Sim	Sem Navios
12	Sim	Com Navios	28	Sim	Sem Navios
13	Sim	Sem Navios	29	Sim	Sem Navios
14	Sim	Com Navios	30	Sim	Com Navios
15	Sim	Sem Navios	31	Sim	Com Navios
16	Sim	Com Navios			

Esta análise permitiu saber quais os dias seria possível utilizar o modelo de dispersão para que a simulação e modelação dos dados recolhidos fosse a mais adequada possível. Assim, no mês de julho verificou-se que apenas cinco dias não foi prevista a captação de dados por parte dos sensores em estudo, dos quais apenas um dos dias apresentava navios presentes em porto. Os restantes dias do mês com navios presentes, é possível realizar a simulação da dispersão dos poluentes.

6.2.4. Dispersão dos Poluentes

Elaborou-se o modelo de dispersão da curva Gaussiana de modo a verificar a influência da poluição efetuada pelos navios na área metropolitana de Lisboa. Este modelo foi implementado numa folha de cálculo do *Excel* especialmente construída para o efeito. Através da utilização do modelo de dispersão é possível estimar quanto da poluição efetuada pelos navios é correspondente ao que está a ser medido pelos sensores. Assim, foram utilizados os três dias mencionados no capítulo anterior para realizar esta

simulação. Os dados obtidos encontram-se representados nas Tabelas 14, 15 e 16 e nas Figuras 54, 55 e 56.

Tabela 14 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores da “Estação Física”, “P2 Móvel” e “Olivais” numa terça-feira.

Sensor	Navios	CO (mg/m ³)	NO _x (µg/m ³)	SO _x (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	
Estação Física	Simulado	Spirit of Adventure	0	0	0	0	0
		Disney Dream	0	0	0	0	0
		Spirit of Adventure + Disney Dream	0	0	0	0	0
	Real	0,19	33,34	1,77	6,81	10,24	
P2	Simulado	Spirit of Adventure	0,48	9,11	0,24	0,74	0,69
		Disney Dream	0,17	3,23	0,08	0,06	0,05
		Spirit of Adventure + Disney Dream	0,66	12,34	0,32	0,80	0,73
	Real	0,30	30,55	2,17	8,47	12,59	
Olivais	Simulado	Spirit of Adventure	0,19	3,59	0,09	0,29	0,27
		Disney Dream	0,65	12,15	0,31	0,24	0,18
		Spirit of Adventure + Disney Dream	0,84	15,74	0,40	0,53	0,45
	Real	0,19	11,43	6,47	8,67	22,01	

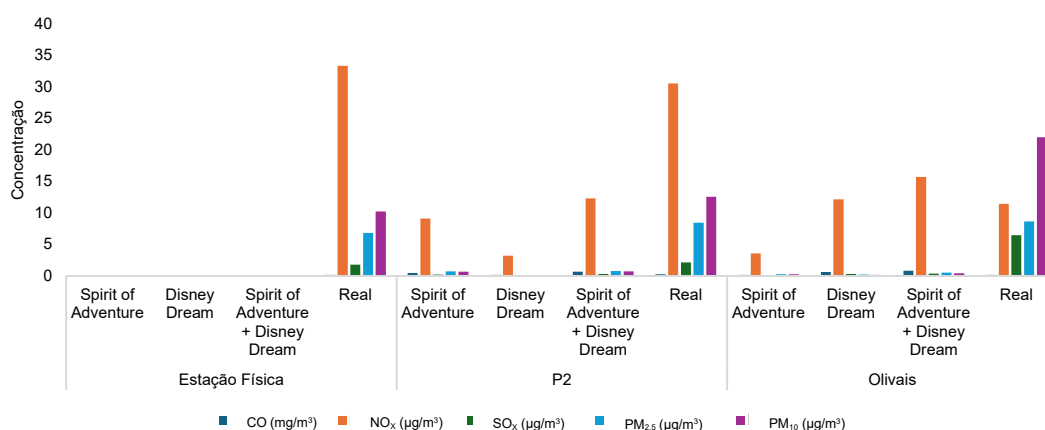


Figura 54 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores “Estação Física”, “P2 Móvel” e “Olivais” numa terça-feira.

Tabela 15 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores “Estação Física”, “P2 Móvel” e “Olivais” numa quarta-feira.

Sensor	Navios	CO (mg/m ³)	NO _x (µg/m ³)	SO _x (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	
Estação Física	Simulado	Mein Schiff 2	0	0	0	0	0
		Ventura	0	0	0	0	0
		Mein Schiff 2 + Ventura	0	0	0	0	0
	Real	0,19	11,28	1,98	4,26	3,29	
P2	Simulado	Mein Schiff 2	0,01	0,22	0,01	0,02	0,02
		Ventura	0	0,5	0	0	0
		Mein Schiff 2 + Ventura	0,01	0,72	0,01	0,02	0,02
	Real	0,26	23,66	1,20	8,15	5,26	
Olivais	Simulado	Mein Schiff 2	0,27	5,17	0,14	0,42	0,39
		Ventura	1,13	21,21	0,53	0,41	0,31
		Mein Schiff 2 + Ventura	1,4	26,38	0,67	0,83	0,7
	Real	0,16	8,22	5,27	10,26	5,06	

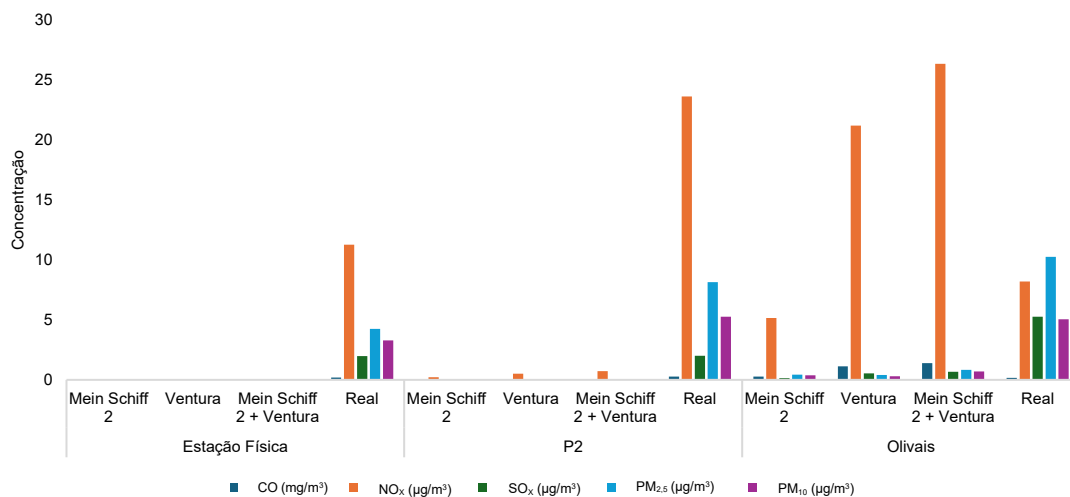


Figura 55 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores “Estação Física”, “P2 Móvel” e “Olivais” numa quarta-feira.

Tabela 16 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores “Estação Física”, “P2 Móvel” e “Olivais” numa quinta-feira.

Sensor		Navios	CO (mg/m ³)	NO _x (µg/m ³)	SO _x (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Estação Física	Simulado	Ventura	0	0	0	0	0
	Real		0,15	8,14	1,92	7,12	5,78
P2	Simulado	Ventura	0	0,08	0	0	0
	Real		0,26	15,33	2,10	13,39	9,53
Olivais	Simulado	Ventura	2,09	39,3	0,99	0,76	0,58
	Real		0,19	7,2	3,01	13,21	0,8

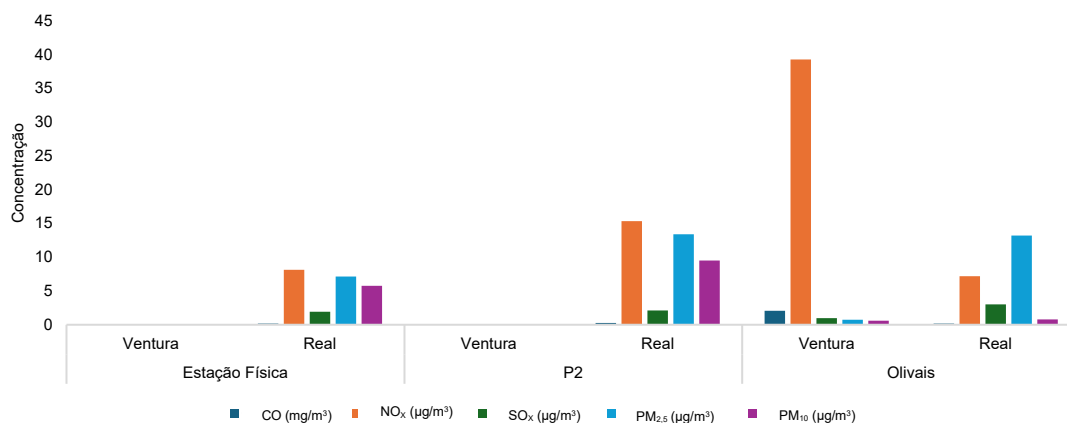


Figura 56 - Comparação dos valores simulados através do modelo de dispersão da Curva Gaussiana e os valores reais medidos pelos sensores “Estação Física”, “P2 Móvel” e “Olivais” numa quinta-feira.

As concentrações dos diferentes poluentes na Tabela 13, 14 e 15 revelam que:

- A concentração estimada de CO e NO_x é geralmente superior à realidade no sensor dos “Olivais”, podendo isto ser explicado pela quantidade de edifícios que rodeiam esta estação, fazendo com que apenas seja detetado parte das emissões deste local;
- Nos restantes poluentes a contribuição dos navios de cruzeiro foi inferior aos valores reais medidos;
- Devido à estabilidade meteorológica de Pasquill determinada para todos os dias simulados, não é previsto que a “Estação-Física” capte as emissões provindas dos navios, sendo estas mais notáveis apenas no sensor dos “Olivais” e no “P2-Móvel”.
- Analisando a simulação do dia de terça-feira, é previsto que no sensor “P2-Móvel”, 40,38% das emissões de NO_x, 14,8% das emissões de SO_x, 9,45% das emissões de PM_{2,5} e 5,82% das emissões de PM₁₀ sejam provindas dos navios de cruzeiro. Quanto

ao sensor dos “Olivais” é previsto que 6,2% das emissões de SO_x, 6,08% das emissões de PM_{2,5} e 2,05% das emissões de PM₁₀ sejam providas dos navios de cruzeiro.

- Analisando a simulação do dia de quinta-feira, estima-se que no sensor “P2-Móvel”, 3,83% das emissões de CO, 3,04% das emissões de NO_x, 0,5% das emissões de SO_x, 0,25% das emissões de PM_{2,5} e 0,38% das emissões de PM₁₀ sejam providas dos navios de cruzeiro. Quanto ao sensor dos “Olivais” é previsto que 12,72% das emissões de SO_x, 8,09% das emissões de PM_{2,5} e 13,83% das emissões de PM₁₀ sejam providas dos navios de cruzeiro.
- Analisando a simulação do dia de quarta-feira, estima-se que no sensor dos “Olivais” que 32,91% das emissões de SO_x, 5,75% das emissões de PM_{2,5} e 72,50% das emissões de PM₁₀ sejam providas dos navios de cruzeiro.
- Nenhum dos poluentes mostrou concentrações superiores aos objetivos da qualidade do ar da APA e conseqüentemente os valores foram também inferiores às recomendações de valores limite da OMS (APA, 2021b; WHO, 2021).
- Quanto à avaliação da qualidade do ar segundo o índice QualAr (APA, 2021a), terça, quarta e quinta-feira apresentaram uma classificação “Muito Bom”, “Bom” e “Bom”, respetivamente. Tanto a quarta-feira como a quinta-feira apresentaram apenas a classificação de “Bom” pois a concentração de PM_{2,5} no sensor “Olivais” foi superior a 10 µg/m³.

6.2.5. Comparação entre poluição rodoviária e poluição originada pelos navios de cruzeiro

De forma a realizar uma comparação das emissões dos automóveis que circulam na cidade de Lisboa todos os dias e os navios de cruzeiro, recorreu-se a fatores de emissão para automóveis ligeiros e pesados estando estes representados na Tabela 17. De forma a simplificar os cálculos foi considerado que todos os automóveis eram movidos a gasolina e todos os veículos pesados eram movidos a *diesel*.

Tabela 17 - Fatores de emissão utilizados para os automóveis, pesados, navios a MGO e navios a HFO (Fontelle *et al.*, 2023; Ntziachristos & Samaras, 2019)

Poluentes/GEE	Fatores de Emissão (kg/ton de combustível)			
	Automóveis	Pesados	Navios (MGO)	Navios (HFO + <i>Scrubbers</i>)
CO	269,5	10,57	3,84	3,67
NO _x	29,89	38,29	72,2	69,1
SO _x	0,01	0,01	1,82	1,82
PM ₁₀	0,04	1,57	1,07	5,2
PM _{2,5}	0,04	1,57	1,4	5,6
CO ₂	9,89	3,32	3120	3120

Seguidamente utilizou-se os dados dos consumos médios dos paquetes, de 1,2 ton/h para navios a HFO e 1,1 ton/h para navios a MGO. Considerou-se também que os automóveis realizaram consumos médios de 10 L/100 km, os camiões 40 L/100 km e os autocarros 50 L/100 km. Por sua vez, considerou-se que os veículos terrestres realizam em média um total de 100 km por dia.

Os consumos dos veículos foram convertidos em kg de combustível/h e aplicaram-se os fatores de emissão. Seguidamente, verificou-se quantas unidades de cada veículo eram necessárias para que os mesmos efetuassem a mesma quantidade de emissões médias que um navio de cruzeiro a MGO e outro a HFO. Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 57.

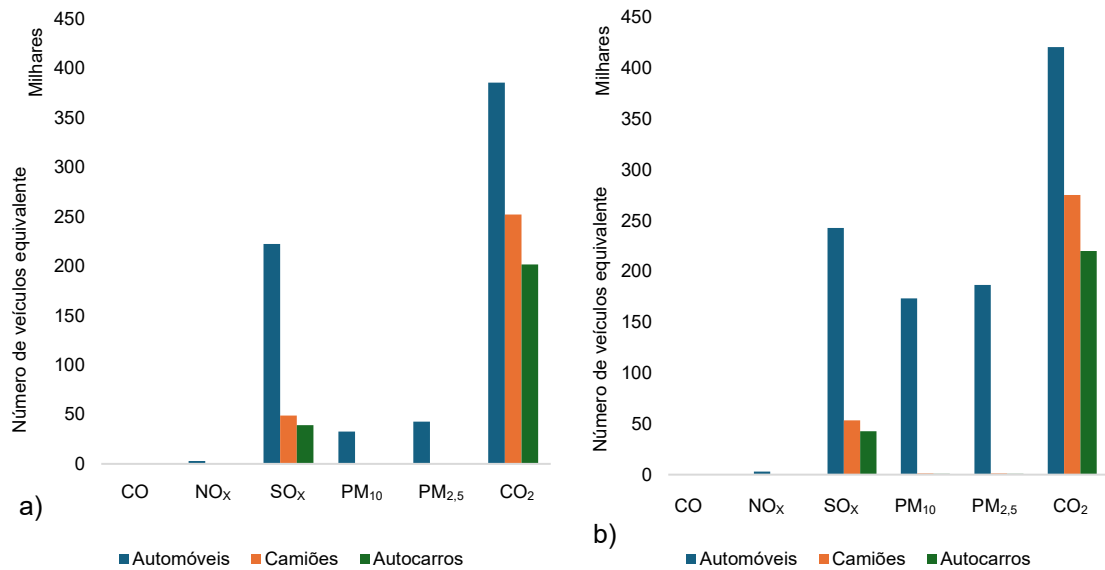


Figura 57 - Número de veículos equivalentes à emissão dos poluentes CO, NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5} e CO₂, a) Navios a MGO b) Navios HFO com *scrubbers*.

Através da Figura 57 verifica-se que os gases que apresentam uma maior diferenciação entre os navios e os automóveis, relativamente às emissões, são o CO₂, as partículas e o SO_x, sendo isto esperado devido à composição dos combustíveis navais e à quantidade que os mesmos necessitam de consumir para manter o funcionamento do navio.

Fez-se ainda uma comparação entre as emissões efetuadas por um navio com a quantidade de veículos que circulam na cidade de Lisboa. Para tal considerou-se que circulam 500 000 automóveis por dia na cidade, 1600 autocarros e 500 camiões. Ao considerar-se esta quantidade de veículos, os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 58.

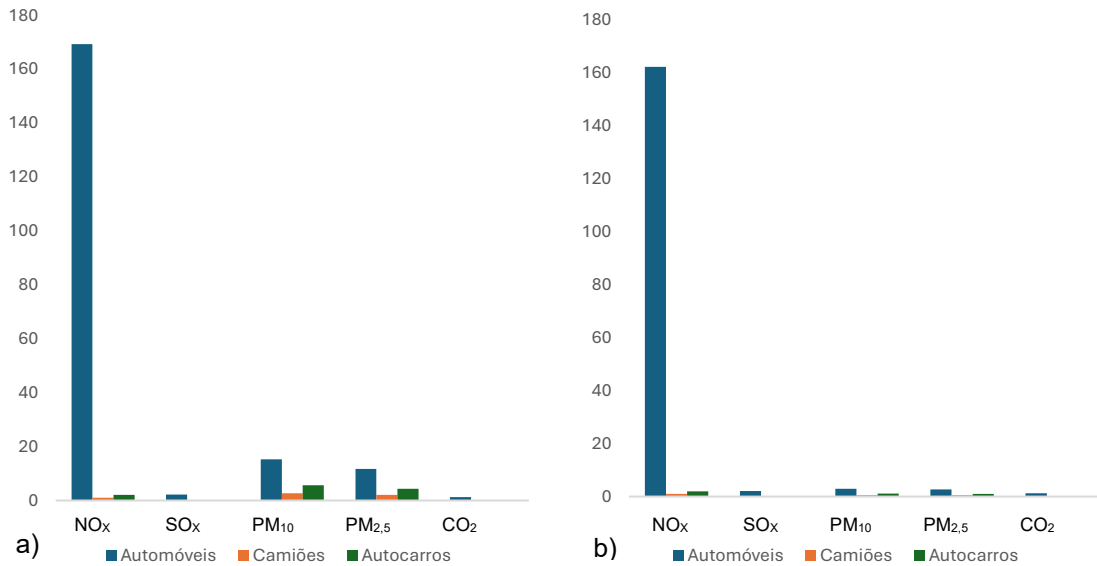


Figura 58 - Número de navios equivalentes ao total de veículos que circulam na cidade de Lisboa diariamente em relação à emissão dos poluentes do NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2,5} e CO₂, a) Navios a MGO b) Navios HFO com *scrubbers*.

Na Figura 58 não se encontra representada a quantidade equivalente de navios para as emissões de CO, pois estas são extremamente elevadas em relação aos restantes poluentes. Assim, o número equivalente de navios de cruzeiros a MGO em relação aos automóveis, quanto às emissões de CO são de 28 711, enquanto em relação aos navios a HFO são 27 538.

Verifica-se que o NO_x, é o segundo poluente mais emitido pelos automóveis em comparação com os navios de cruzeiro, sendo necessários cerca de 170 navios a MGO e 162 navios a HFO para produzir a mesma quantidade de NO_x, que os automóveis que circulam em Lisboa.

É possível denotar-se também que o total dos vários veículos que circulam na cidade de Lisboa emitem maiores quantidade de PM₁₀ e PM_{2,5} que os navios de cruzeiro. Por outro lado, apenas um cruzeiro emite mais SO_x e CO₂ que os vários veículos que circulam na cidade de Lisboa.

Capítulo 7

Conclusões e Perspetivas Futuras

Durante o período abrangido por este trabalho ocorreram 222 escalas, as quais foram efetuadas por 109 navios diferentes, dos quais foram inspecionados 47 (43%). Considerando que certos navios possuem *sister ships* (navios idênticos), foram cobertos no total 64% dos navios que passaram pelo Porto de Lisboa, contabilizando 174 escalas das 222 realizadas, sendo este valor equivalente a 78%.

Este número de escalas consideradas foi alcançado dado que 90% dos navios que mais vezes atracaram no Porto de Lisboa (realizaram entre três e mais de dez escalas) foram inspecionados. Verificou-se também que cerca de 85% dos navios atracam entre as 6 - 9h da manhã e 78% partem entre as 15-21h.

Através dos dados recolhidos durante as inspeções, concluiu-se que a maioria dos navios (45%) possui dimensões intermédias (50-100 GT), seguidos por navios de pequeno porte (28%, menos de 50 GT), navios de médio-grande porte (21%, 100-150 GT) e, por fim, navios de grande porte (6%, mais de 150 GT)

Conclui-se também que a maioria dos navios opta por utilizar combustíveis mais limpos, isto é, com menor teor de enxofre. Muitos dos que optam por utilizar MGO (menos de 0.1% de enxofre) como o seu principal combustível são navios de pequeno porte, porém também se verifica que navios de médio/grande porte começam a escolher este combustível como o seu principal. Navios de grande porte optam maioritariamente por utilizar HFO, embora se verifica, cada vez mais, uma transição deste combustível para combustíveis mais limpos, dado que 70% dos navios inspecionados utilizaram MGO como o seu combustível principal e apenas 26% optam por utilizar HFO. Os navios movidos a LNG continuam a ser a minoria (representando apenas 4% dos navios inspecionados e 0.57% dos navios à escala mundial).

Relativamente às emissões de poluentes, concluiu-se a partir dos dados recolhidos durante as inspeções e os fatores de emissão utilizados, que a emissão de certos poluentes irá ter maior ou menor influência dependendo do tipo de combustível que o navio utiliza. Navios a MGO emitem maiores quantidade de NO_x , enquanto navios a HFO emitem maiores quantidade de SO_x e material particulado (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$). Navios equipados com *scrubbers* apresentam melhorias significativas no que se toca às emissões de SO_x , mas não será de esperar tais melhorias nas emissões dos restantes poluentes. O LNG foi o combustível que apresentou melhores resultados na sua generalidade, embora tenha sido o combustível que mais contribui para as emissões de CO.

Foi possível concluir através das representações da variação de poluentes ao longo do estudo e nos Anexos I-XXIV, que não existe uma correlação direta entre o consumo dos navios e o aumento da concentração de poluentes na área da TCL. Verifica-se que em períodos onde se encontravam até três navios atracados em porto e consumos de combustível elevados, as concentrações dos poluentes foram mínimas. Em períodos onde não se encontrava nenhum navio atracado, as concentrações dos poluentes tiveram picos máximos de concentração, o que evidencia que a grande fonte de poluição da cidade de Lisboa não são os poluentes provenientes dos navios, mas sim o tráfego automóvel.

Segundo a monitorização da qualidade do ar realizada pela *SondarLab* em conjugação com os dados recolhidos no sistema QualAr, foi possível retirar-se as seguintes conclusões:

- A concentração de CO esteve abaixo dos valores limites nacionais e europeus e também das recomendações da OMS, apresentando valores inferiores a $1,2 \text{ mg/m}^3$ no mês de julho. Em relação aos restantes meses este cumpriu sempre com os valores limites e com as recomendações da OMS.
- A concentração de NO_x apresentou, no mês de julho, diversos picos superiores aos valores exigidos pela UE e pela OMS, atingindo valores de $130 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, quando o valor limite é de $45 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Os meses de abril e fevereiro apresentaram os maiores picos de concentração de NO_x sendo estes equivalentes a 350 e $450 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, respetivamente. Estes valores podem ser notados nos Anexos I e IX no sensor referente à “Estação Física”. Ao avaliar os valores médios deste poluente ao longo dos meses representados, denota-se que na maioria das vezes este poluente apresentou valores limite inferiores aos exigidos pela EU. Contudo, este atingiu valores superiores a $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ no mês de fevereiro e no mês de abril, valor superior ao recomendado pela OMS ($25 \text{ } \mu\text{g/m}^3$).

- A concentração de SO_x cumpriu com as exigências nacionais, europeias e segundo as recomendações da OMS, apresentando sempre valores inferiores a 40 µg/m³.
- A concentração de PM₁₀ esteve abaixo dos valores limites nacionais e europeus e também das recomendações da OMS, apresentando sempre valores inferiores a 40 µg/m³ em todos os meses estudados, com a exceção do mês de maio no sensor “P3-Móvel” (Anexo LXIV). Contudo, caso este poluente mantivesse as concentrações registadas durante o resto do ano, estes valores seriam superiores aos recomendados pela OMS para o período anual.
- A concentração de PM_{2,5} apresentou diversas vezes picos superiores aos valores exigidos pela UE e pela OMS, atingindo valores perto de 30 µg/m³, no mês de julho. Ainda assim, os valores médios deste poluente ao longo do mês de julho foi inferior 15 µg/m³ (valor máximo recomendado pela OMS num período de 24h). Em relação aos restantes meses, este apresentou no geral concentrações médias inferiores ao valor recomendado pela OMS, para um período de 24h, com a exceção dos meses de fevereiro e maio. Porém, considerando o valor anual recomendado (5 µg/m³), a concentração deste poluente verificou ser acima do mesmo.
- Os dois meses que apresentaram a maior afluência de navios de cruzeiro foram os meses de abril e maio, enquanto o mês de fevereiro foi dos meses que menos escalas houve. Os picos de concentração e médias mais elevadas foram verificados precisamente no mês em que houve menos escalas, o mês de fevereiro. Assim pela análise dos meses representados, não foi possível correlacionar a presença dos navios de cruzeiro com o aumento da concentração dos poluentes.

Quanto à poluição média conclui-se que o trânsito automóvel tem maior influência na qualidade do ar quando comparada com os navios de cruzeiro. Ao verificar-se a poluição média em dias de semana, conclui-se que os dias com cruzeiros não têm impacto nos teores de poluentes, com a exceção do SO_x e NO_x. Por outro lado, em dias de fim de semana, o efeito é observável, verificando-se no geral maiores concentrações de poluentes nos dias com paquetes do que nos dias sem paquetes. Este facto explica-se devido ao menor tráfego automóvel durante o fim de semana e neste caso verifica-se a influência das emissões dos paquetes na qualidade do ar. Na presença de elevado tráfego automóvel, a influência dos paquetes parece-nos pouco relevante face à contribuição dos veículos automóveis movidos a motores de combustão interna.

Ao analisar-se dias específicos da semana nas estações de fundo “Olivais”, “Beato” e “Restelo”, observa-se uma grande dispersão de resultados, mesmo para os dias em que as condições metrológicas foram semelhantes. Os dias da semana analisados nestas condições foram a terça, quarta e quinta-feira. Desta análise não foi evidenciado um efeito direto das emissões dos paquetes na qualidade do ar da cidade. Não foi possível

estabelecer uma correlação entre o aumento da poluição da cidade e a presença dos paquetes. Sendo assim possível concluir que outras fontes de emissão na cidade de Lisboa, provavelmente o tráfego automóvel, afeta mais a qualidade do ar do que os navios de cruzeiro.

As simulações realizadas mostraram que o maior efeito das emissões dos navios do cruzeiro se deveria registar na estação dos “Olivais”. Este efeito foi potenciado pelas condições meteorológicas, que fizeram com que os poluentes fossem transportados para locais mais afastados da fonte emissora, não sendo os efeitos registados nas estações da *SondarLab*, mais próximas dos navios, colocadas perto do nível do mar. Recorde-se que, nos grandes navios de cruzeiro, a altura da chaminé pode atingir os 70 m de altura.

Em termos de simulação, os valores obtidos para as PM e SO_x foram inferiores aos valores reais, embora fosse expectável que estes tivessem maior influência na qualidade do ar devido à composição dos combustíveis navais.

Ao comparar a poluição com origem nos navios de cruzeiro com a poluição proveniente dos carros, dos autocarros e dos camiões, conclui-se que um navio polui o equivalente a milhares de automóveis. Estimou-se que sejam necessários cerca de 400 mil carros, 250 mil camiões ou 200 mil autocarros para emitir a mesma quantidade de CO₂ que um navio de cruzeiro quando atracado. Estes valores são esperados devido à quantidade de combustível que um navio necessita para manter o seu funcionamento.

Considerando o número total de veículos que circulam todos os dias na cidade de Lisboa, verifica-se que estes emitem quantidades semelhantes ou superiores a um navio de cruzeiro. De todas as tipologias de veículos que foram consideradas neste estudo, conclui-se que a qualidade do ar da cidade de Lisboa é mais afetada pelos carros. Na realidade os carros são o meio de transporte dominante na cidade de Lisboa, emitindo significativas quantidades dos poluentes como o NO_x e o CO. Os autocarros e os camiões emitem, de forma geral, maiores quantidades de PM do que os navios de cruzeiro.

Assim, conclui-se que, apesar de os navios de cruzeiro contribuírem significativamente para as emissões de poluentes atmosféricos e GEE, devido à grande quantidade de combustível consumido, nem sempre esta contribuição é visível na monitorização da qualidade do ar da cidade de Lisboa devido à presença de outras fontes de poluição (como automóveis), e às condições atmosféricas usuais na área de estudo. As condições atmosféricas durante o período do estudo contribuíram para dispersar os

poluentes emitidos pelos navios, não sendo possível verificar o seu aumento nas estações de monitorização da *SondarLab*, nem pela rede de monitorização da cidade de Lisboa.

A precessão do impacto negativo que o transporte marítimo poderá ter na qualidade do ar das cidades portuárias, em particular o setor do turismo de cruzeiro, levaram a que fossem aplicadas restrições legais e que os navios tomassem medidas que contribuíssem para uma diminuição das emissões dos poluentes e de GEE.

O TCL exige que todos os navios que se aproximam do porto, que estão atracados e que saem, emitam menos de 0,1% de enxofre. Como já referido, houve várias medidas tomadas: alteração de combustível tradicional para um combustível mais limpo na aproximação do Porto de Lisboa, a utilização de equipamento de redução de emissões de SO_x, os *scrubbers* e a utilização de LNG um combustível mais limpo. A diminuição da emissão de poluentes e de GEE contribui melhorar a qualidade do ar, minimizando o impacto ambiental negativo do turismo de cruzeiro nas cidades portuárias tornando-as mais seguras, saudáveis e sustentáveis.

A utilização do LNG como combustível é uma das medidas que têm vindo a ser tomadas para um futuro mais limpo deste setor turístico. O LNG é o combustível que mais vai ao encontro dos objetivos da Agenda 2030, promove a eficiência energética (ODS 7), diminui as emissões perto de cidades (ODS 11 e 13) e contribui para uma melhor qualidade de vida e proteção da vida marinha perto dos portos (ODS 3 e 14).

O TCL está a instalar um sistema OPS para que os navios, que tem possibilidade, não utilizem qualquer combustível fóssil para evitar a emissão de poluentes e de GEE enquanto estão atracados e possam manter o seu funcionamento, contribuindo para uma melhor qualidade do ar e minimizar o impacto nas alterações climáticas.

O aumento das medidas restritivas e das medidas do controlo da qualidade do ar não afetaram a rentabilidade do Porto de Lisboa, tendo este vindo a ser recordista ano após ano como um dos melhores portos de cruzeiros a nível mundial, contribuindo isto para economia tanto da cidade como do país, para uma cidade mais sustentável e para minimizar as alterações climáticas. Ou seja, todas estas medidas têm contribuído para alcançar os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS), em particular: o ODS 3 e o 11 – na medida em que ao melhorar a qualidade do ar, melhora a saúde pública e o bem-estar de todos os habitantes e turistas da cidade e torna-a mais resiliente, segura e sustentável; ODS 7 e 13 - a instalação da OPS contribuir para um melhor acesso à energia fiável e renovável para os navios e minimiza a emissão de GEE

combatendo as alterações climáticas, e por fim o ODS 14 – a limitação da emissão de poluentes e a limitação de utilização de os *scrubbers open loop* contribui em para proteger a vida marítima.

Ainda assim, existem melhorias que poderão ser realizadas no futuro para melhorar a qualidade do ar, a monitorização, controlo e a sustentabilidade deste setor. Um dos pontos a melhorar é a rede de monitorização da qualidade do ar. Os sensores utilizados localizam-se todos na margem norte do rio Tejo. Caso os ventos estivessem com direção sul, as emissões dos cruzeiros não seriam monitorizadas na margem sul. Assim, de forma a melhorar a qualidade da rede de monitorização do ar, deveria ser instalado vários sensores na zona de Cacilhas (Almada), Seixal, Barreiro, Montijo e Alcochete. Apenas os sensores da *SondarLab* e dos “Olivais” têm a capacidade de detetar toda a gama de poluentes em estudo. Para além disso, nenhum dos sensores utilizados neste estudo, tinha a capacidade de medir as concentrações de ozono. Seria importante monitorar as concentrações deste gás, dado que o mesmo promove consequências graves para a saúde humana e para o ambiente, pelo que também é uma melhoria a ser realizada de forma a alcançar cada vez mais uma melhor qualidade do ar na cidade de Lisboa. Especial atenção deverá ser dada à altura de colocação dos sensores para que estes possam detetar os gases emitidos pelas chaminés dos navios que são geralmente bastante altas.

Na receção dos navios de cruzeiro também existem várias melhorias que poderão ser realizadas. Em certos países os navios de cruzeiro são taxados tendo em conta as emissões atmosféricas dos mesmos, possuindo os navios sensores instalados no sistema de exaustão de gases que realizam uma monitorização constante do que está a ser emitido, e acessíveis em tempo real pelas autoridades portuárias.

A transição dos combustíveis tradicionais para combustíveis mais limpos é uma das medidas mais eficazes para a minimização do impacto deste setor turístico na qualidade do ar. Contudo um dos grandes problemas para alcançar esta transição é a capacidade de fornecimento destes novos combustíveis e os preços dos mesmos. Combustíveis como o hidrogénio, amónia, LNG e LPG são combustíveis que têm baixa produção e são geralmente mais caros que os combustíveis tradicionais não existindo incentivos para que seja efetuada esta transição. Assim, futuramente a melhoria da rede de fornecimento e o incentivo à criação de fábricas para a produção destes combustíveis são formas de se poder atingir esta transição.

Bibliografia

- 2.^a Comissão Permanente. (2023). Lisboa e os cruzeiros.
- ABS. (2018). Advisory on Exhaust Gas Scrubber Systems.
- Abs, by, & Delft, C. (2023). Potential of Wind-Assisted Propulsion for Shipping. www.emsa.europa.eu
- Adams, M. (2013). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013 Technical guidance to prepare national emission inventories.
- Al-Delaimy, W. K., Ramanathan, V., Sánchez, M., & Editors, S. (2020). Health of People, Health of Planet and Our Responsibility (Wael K. & Al-Delaimy, Eds.; 1st Edition). Springer Open.
- Alfa Laval. (2018). Marine fuels in the low-sulphur era.
- APA. (2021a). Índices de qualidade do ar | Agência Portuguesa do Ambiente. <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/indices-de-qualidade-do-ar>
- APA. (2021b). Objetivos de qualidade do ar | Agência Portuguesa do Ambiente. <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/objetivos-de-qualidade-do-ar>
- APA. (2021c). Objetivos de redução de emissões | Agência Portuguesa do Ambiente. <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/objetivos-de-reducao-de-emissoes>
- APA. (2021d). Óxidos de Azoto (NOx) | Agência Portuguesa do Ambiente. <https://www.apambiente.pt/ar-e-ruído/oxidos-de-azoto-nox>
- APA. (2021e). Qualidade do ar | Agência Portuguesa do Ambiente. <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/qualidade-do-ar-0>
- APA. (2021f). Redes de Medição. <https://Apambiente.Pt/Ar-e-Ruido/Redes-de-Medicao>.
- APL. (2014). Regulamento de Autoridade Portária da APL - Administração do Porto de Lisboa, S.A.
- APL. (2023a). Cruzeiros: Porto de Lisboa bate recorde no segmento turnaround - Porto de Lisboa. <https://www.portodelisboa.pt/pt/-/cruzeiros-porto-de-lisboa-bate-recorde-no-segmento-turnaround>
- APL. (2023b). Indústria dos cruzeiros em Lisboa contribuiu com 336 milhões de euros para o PIB nacional - Porto de Lisboa. <https://www.portodelisboa.pt/pt/-/ind%C3%BAstria-dos-cruzeiros-em-lisboa-contribuiu-com-336-milh%C3%B5es-de-euros-para-o-pib-nacional>
- APL. (2023c). Lisboa e o seu Porto - Porto de Lisboa. <https://www.portodelisboa.pt/lisboa-e-o-seu-porto>
- APL. (2023d). Memória Institucional - Porto de Lisboa. <https://www.portodelisboa.pt/memoria-institucional>
- APL. (2023e). Resíduos - Porto de Lisboa. <https://www.portodelisboa.pt/residuos>
- APL. (2023f, November 21). Atividade dos cruzeiros em Lisboa com impacto mínimo na qualidade do ar - Porto de Lisboa. <https://www.portodelisboa.pt/pt/-/atividade-dos-cruzeiros-em-lisboa-com-impacto-m%C3%ADnimo-na-qualidade-do-ar>

- APL. (2024a). Mapa do porto - Porto de Lisboa. <https://www.portodelisboa.pt/mapa-do-porto>
- APL. (2024b). Terminal de Cruzeiros de Lisboa - Porto de Lisboa. <https://www.portodelisboa.pt/terminal-de-cruzeiros-de-lisboa>
- APL. (2024c, January 11). 2023: Ano de recordes da atividade de cruzeiros no Porto de Lisboa - Porto de Lisboa. <https://www.portodelisboa.pt/pt/-/2023-ano-de-recordes-da-atividade-de-cruzeiros-no-porto-de-lisboa>
- APP. (2024, July 1). Associação dos Portos de Portugal. <https://www.portosdeportugal.pt/detail.php?nID=33089>
- Babicz, J., Okretowe, B., & Wärtsilä. (2015). Wärtsilä Encyclopedia of ship technology. In Book (2nd Edition). Wärtsilä Corporation.
- Bilgili, L. (2023). A systematic review on the acceptance of alternative marine fuels. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 182). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113367>
- Boubel, R. W., Fox, D. L., Turner, D. B., & Stern, A. C. (1994). *Fundamentals of Air Pollution* (3rd Edition). Elsevier.
- Breeze, P. (2018). Types of Reciprocating Engine. *Piston Engine-Based Power Plants*, 21–33. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812904-3.00003-3>
- Büke, T., Çi, A., Gdem Köne, ~, Cavallaro, F., & Rosen, M. A. (2016). Assessing Air Quality in Turkey: A Proposed, Air Quality Index. <https://doi.org/10.3390/su8010073>
- Čampara, L., Hasanspahić, N., & Vujičić, S. (n.d.). Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20185801004>
- Chang, Y. T., Roh, Y., & Park, H. (2014). Assessing noxious gases of vessel operations in a potential Emission Control Area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 28, 91–97. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2014.03.003>
- COM/2020/789. (2020). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=COM:2020:789:FIN>
- Conselho Europeu, & Conselho da União Europeia. (2024). *Qualidade do ar - Consilium*. <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/air-quality/>
- Corbett, J. J., & Koehler, H. W. (2003). Updated emissions from ocean shipping. *J. Geophys. Res.*, 108(D20), 4650. <https://doi.org/10.1029/2003JD003751>
- Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., & Lauer, A. (2007). Mortality from ship emissions: A global assessment. *Environmental Science and Technology*, 41(24), 8512–8518. https://doi.org/10.1021/ES071686Z/SUPPL_FILE/ES071686Z-FILE002.PDF
- Cruise ships - Transport & Environment. (n.d.). Retrieved March 23, 2024, from <https://www.transportenvironment.org/challenges/ships/cruise-ships/>
- Culliane, K., & Talley, W. K. (2006). *Port Economics* (K. Culliane & W. K. Talley, Eds.; 1st Edition, Vol. 16). Elsevier.
- Cullinane, K., & Bergqvist, R. (2014). Emission control areas and their impact on maritime transport. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.12.004>
- Decisão de Execução (UE) 2015/ 253 da Comissão. (2015).

- Decisão de Execução (UE) 2015/253 da Comissão de 16 de fevereiro de 2015. (2015).
- Decreto do Governo n.º 25/87 de 10 de julho de 1987. (1987). <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-governo/25-663571>
- Decreto-Lei n.º 1/2008, de 03 de Janeiro. (2008). https://www.pgdlisboa.pt/leis/lei_mostra_articulado.php?nid=966&tabela=leis&ficha=1&pagina=1
- Decreto-Lei n.º 47/2017. (2017). <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/47-2017-106982550>
- Decreto-Lei n.º 102/2010. (2010). <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/102-2010-342123>
- Decreto-Lei n.º 281/2000 . (2000). <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/281-2000-614348>
- DGRM. (2018). Teor Máximo de Enxofre nos Combustíveis Navais. <https://www.dgrm.pt/en/teor>
- Diretiva 2009/42/CE Do Parlamento Europeu e do Conselho
- Diretiva 2004/107/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 15 de Dezembro de 2004. (2004).
- Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 21 de maio de 2008 . (2008).
- Diretiva (UE) 2016/ 802 do Parlamento Europeu e do Conselho. (2016).
- Diretiva (UE) 2015/ 1480 da Comissão de 28 de agosto de 2015 . (2015).
- EEA. (2023). How air pollution affects our health | European Environment Agency's home page. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution/eow-it-affects-our-health>
- EMISA. (2024). The role of Flag States – EMISA. <https://emisa.eu/the-role-of-flag-states/>
- Endres, S., Maes, F., Hopkins, F., Houghton, K., Mårtensson, E. M., Oeffner, J., Quack, B., Singh, P., & Turner, D. (2018). A new perspective at the ship-air-sea-interface: The environmental impacts of exhaust gas scrubber discharge. *Frontiers in Marine Science*, 5(APR), 361303. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2018.00139/BIBTEX>
- ENTEC. (2002). Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community. https://ec.europa.eu/environment/archives/air/pdf/chapter3_end_ship_emissions.pdf
- European Environment Agency. (2023, December 18). Emissions of air pollutants from transport in Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/emissions-of-air-pollutants-from>
- Fontelle, J.-P., Fridell, E., Grigoriadis, A., Hill, N., Kilde, N., Lavender, K., Mamarikas, S., Reynolds, G., Rypdal, K., Thomas, R., Webster, A., & Winther, M. (2023). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 1 Category Title NFR 1.A International maritime and inland navigation, national navigation, national fishing, recreational boats International maritime navigation, international inland navigation, national navigation (shipping), national fishing EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 2.

- Google Earth. (n.d.). Retrieved October 29, 2024, from <https://earth.google.com/web/>
- Guarasa, J. N., Ordás, S., Francesc, J., & Martínez De Osés, X. (2017). Study on the impact of cruise ships calling at Barcelona in the city air quality. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/107741>
- Han, C. H. (2010). Strategies to Reduce Air Pollution in Shipping Industry. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 26(1), 7–29. [https://doi.org/10.1016/S2092-5212\(10\)80009-4](https://doi.org/10.1016/S2092-5212(10)80009-4)
- Hoarau-Heemstra, H., Wigger, K., Olsen, J., & James, L. (2023). Cruise tourism destinations: Practices, consequences and the road to sustainability. *Journal of Destination Marketing & Management*, 2212–2571. <https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2023.100820>
- Hughes, E., Dispert, A., Hoe, M., & Jones, J. (2022). Clause-by-Clause analysis of MARPOL Annex VI.
- Hunter, K. A., Liss, P. S., Surapipith, V., Dentener, F., Duce, R., Kanakidou, M., Kubilay, N., Mahowald, N., Okin, G., Sarin, M., Uematsu, M., & Zhu, T. (2011). Impacts of anthropogenic SO_x, NO_x and NH₃ on acidification of coastal waters and shipping lanes. *Geophysical Research Letters*, 38(13). <https://doi.org/10.1029/2011GL047720>
- IMO. (n.d.-a). Convention on the International Maritime Organization. Retrieved September 21, 2024, from <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/Convention-on-the-International-Maritime-Organization.aspx>
- IMO. (n.d.-b). List of IMO Conventions. Retrieved September 22, 2024, from <https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/ListOfConventions.aspx>
- IMO. (2020). IMO 2020 - cleaner shipping for cleaner air. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>
- IMO. (2022). Fuel Consumption and Carbon Intensity. <https://futurefuels.imo.org/home/latest-information/fuel-consumption-dcs/>
- IMO. (2024a). Fuel Uptake – IMO. <https://futurefuels.imo.org/home/latest-information/fuel-uptake/>
- IMO. (2024b). IMO progress on revised GHG strategy, Mediterranean ECA adopted. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC-79.aspx>
- IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions. (n.d.). Retrieved March 27, 2024, from <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- Jägerbrand, A. K., Brutemark, A., Barthel Svedén, J., & Gren, I. M. (2019). A review on the environmental impacts of shipping on aquatic and nearshore ecosystems. *Science of The Total Environment*, 695, 133637. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.133637>
- Lange, B., Till, M., Lutz, J., & Helfst, P. (2015). Impacts of scrubbers on the environmental situation in ports and coastal waters. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/impacts-of-scrubbers-on-the-environmental-situation>
- Lichtfouse, E., & Schwarzbauer, J. (2020). Environmental Chemistry for a Sustainable World Volume 20 Series Editors (Pallavi Saxena & Anju

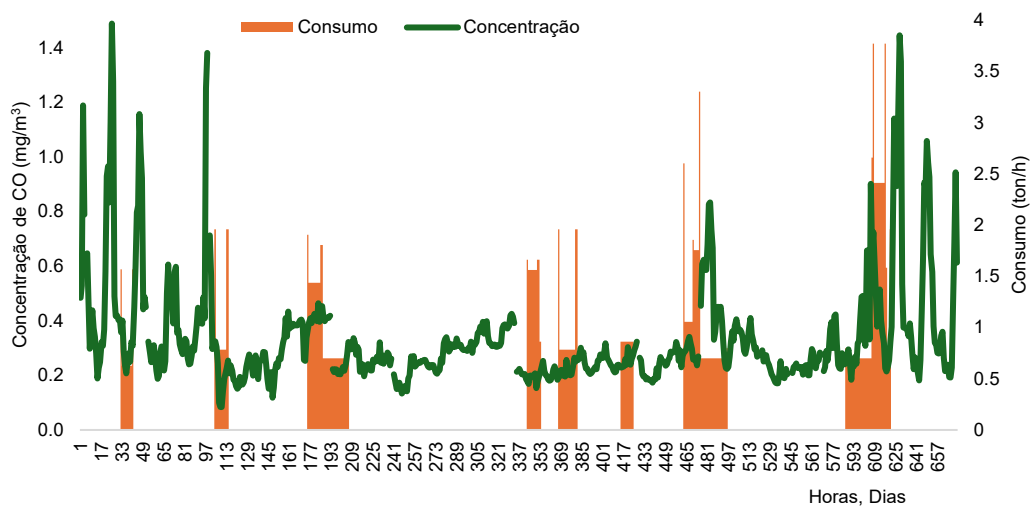
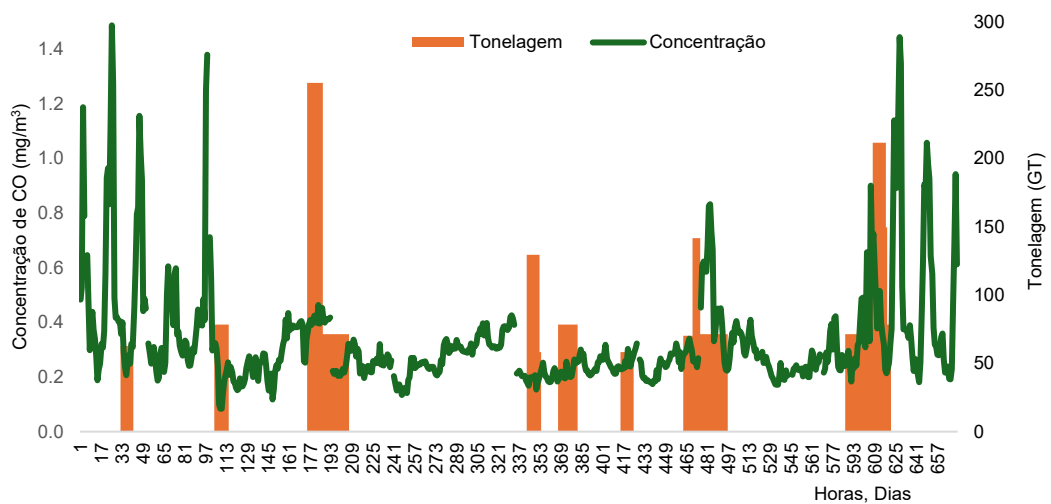
- Srivastava, Eds.; 1st Edition, Vol. 20). Springer. <http://www.springer.com/series/11480>
- Logunova, N., Kalinkina, S., Lazitskaya, N., & Tregulova, I. (2020). Specifics of cruise tourism and features of creating a cruise tourism product. *E3S Web of Conferences*, 217. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021705005>
- Mallidis, I., Despoudi, S., Dekker, R., Iakovou, E., & Vlachos, D. (2020). The impact of sulphur limit fuel regulations on maritime supply chain network design. *Annals of Operations Research*, 294, 677–695. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2999-4>
- Marcovecchio, J. E., De Marco, S. G., & Melo, W. D. (2017). Ancient vs. modern oceans: Perspectives in a climate change scenario. In *Marine Pollution and Climate Change*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315119243-1>
- Maritime safety: Council adopts legislation for safer journeys with ferries in Europe - Consilium. (n.d.). Retrieved March 23, 2024, from <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/04/25/maritime-safety-council-adopts-legislation-for-safer-journeys-with-ferries-in-europe/>
- Mersin, K., Alkan, G., & Mısırlıoğlu, T. (2017). A new method for calculating fuel consumption and displacement of a ship in maritime transport. *Cogent Engineering*, 4(1), 1415107. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1415107>
- Miola, A., Ciuffo, B., Giovine, E., & Marra, M. (2010). Regulating Air Emissions from Ships: The State of the Art on Methodologies, Technologies and Policy Options. *JRC Reference Reports*, 68. <https://doi.org/10.2788/4171>
- Monteiro, A., Russo, M., Gama, C., & Borrego, C. (2018). How important are maritime emissions for the air quality: At European and national scale. *Environmental Pollution*, 242, 565–575. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2018.07.011>
- Moreno-Gutiérrez, J., Pájaro-Velázquez, E., Amado-Sánchez, Y., Rodríguez-Moreno, R., Calderay-Cayetano, F., & Durán-Grados, V. (2019). Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data. *Science of the Total Environment*, 650, 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.045>
- Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2019). 1.A.3.b.i-iv Road transport 2019-2. European Environment Agency.
- OECD. (2011). *Environmental Impacts of International Shipping: The Role of Ports*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264097339-en>
- Oiltanking. (2024). Oiltanking: Marine Gasoil (MGO). <https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/marine-gasoil-mgo.html>
- Oiltanking: Marine Diesel Oil (MDO) & Intermediate Fuel Oil (IFO). (n.d.). Retrieved March 23, 2024, from <https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/marine-diesel-oil-mdo-intermediate-fuel-oil-ifo.html>
- Okubo, M., & Kuwahara, T. (2020). *New Technologies for Emission Control in Marine Diesel Engines* (Elsevier & Butterworth-Heinemann, Eds.; 1st Edition). Elsevier.
- Ormazabal. (2024). Port electrification: what is and how does it work? | Ormazabal. <https://www.ormazabal.com/en-gb/port-electrification-what-is-how-does-it-work/>

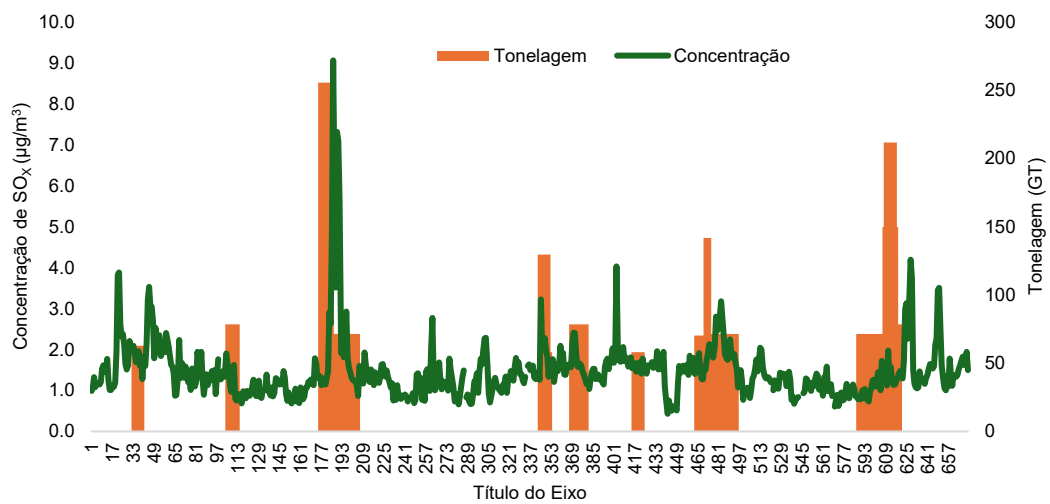
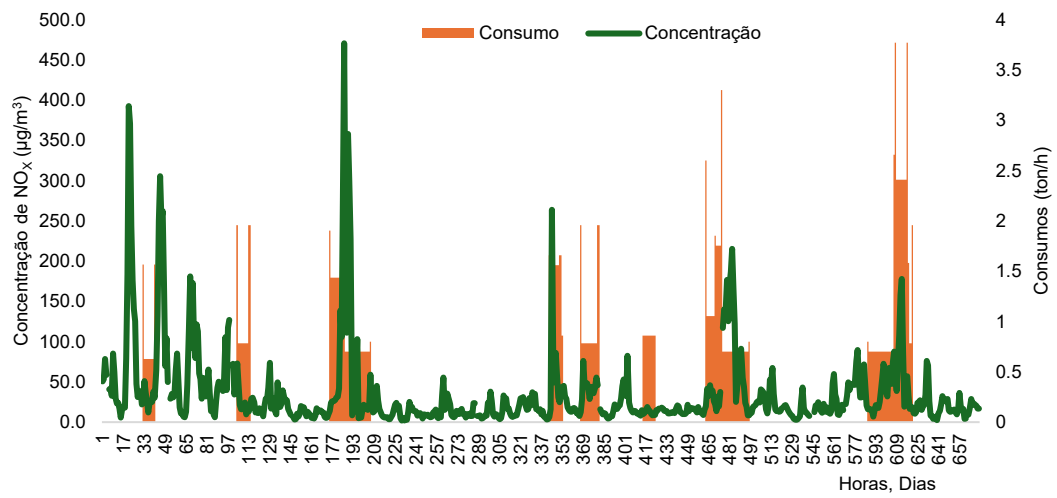
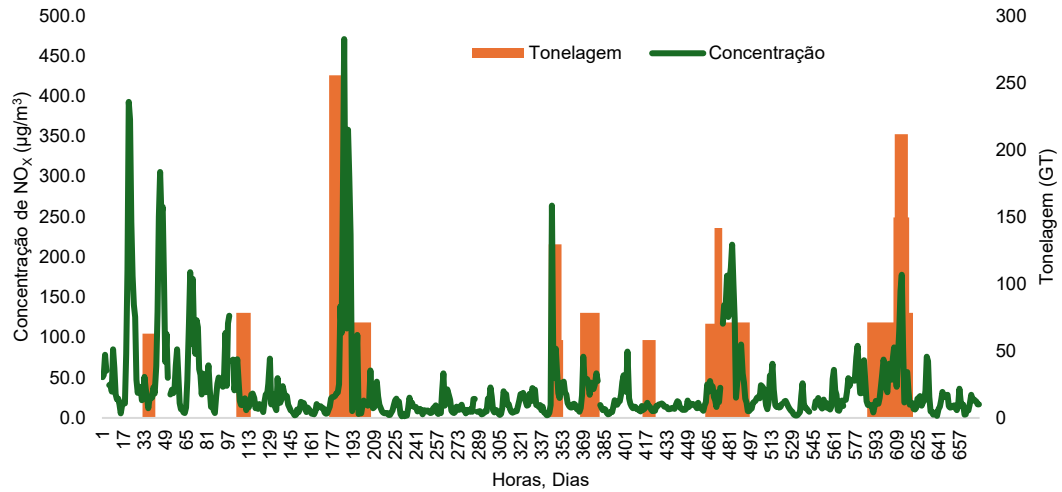
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56(6), 709–742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Programme, U. N. E., & (WTO), W. T. O. (2016). Making Tourism more Sustainable: A Guide for Policy Makers. 209. <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/8741>
- Regulamento (CE) n.º 2099/2002 do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de Novembro de 2002. (2002).
- Schwarzkopf, D. A., Petrik, R., Matthias, V., Quante, M., Majamäki, E., & Jalkanen, J. P. (2021). A ship emission modeling system with scenario capabilities. *Atmospheric Environment: X*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100132>
- Shu, Y., Hu, A., Zheng, Y., Gan, L., Xiao, G., Zhou, C., & Song, L. (2023). Evaluation of ship emission intensity and the inaccuracy of exhaust emission estimation model. *Ocean Engineering*, 287, 115723. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.115723>
- Smirnov, A., Smolokurov, E., Timofeeva, E., & Krovsh, S. (2022). Features of Development of Sea Cruise Tourism. *Transportation Research Procedia*, 61, 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.024>
- Soupez, J.-B. R. G. (2023). View of Structural Challenges of Low-Emission Vessels: A Review. *Intl J Maritime Eng*, 165. <https://doi.org/10.5750/ijme.v165iA2.1233>
- Sun, X., Xu, M., Lau, Y. yip, & Gauri, D. K. (2019). Cruisers' satisfaction with shore experience: An empirical study on a China-Japan itinerary. *Ocean & Coastal Management*, 181, 104867. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2019.104867>
- Tan, Z. (2014). *Green Energy and Technology Air Pollution and Greenhouse Gases From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control* (Elvesier, Ed.; 1st Edition). Springer Science. <http://www.springer.com/series/8059>
- Tiwary, A., & Williams, I. (2019). *Air Pollution Measurement, Modelling and Mitigation* (4th Edition). CRC Press.
- Transport & Environment. (2023). Transport & Environment Further information. www.transportenvironment.org
- Vallero, D. A. . (2019). *Air pollution calculations : quantifying pollutant formation, transport, transformation, fate and risks* (1st Edition). Elsevier.
- VPS. (2024, January 29). 2023 Marine Bunker Fuels. <https://www.vpsveritas.com/knowledgecentre/articles/2023-marine-bunker-fuels-review>
- Wang, L., & Li, Y. (2023). Estimation methods and reduction strategies of port carbon emissions-what literatures say? <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115451>
- Weather Underground. (n.d.). Retrieved October 29, 2024, from <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IALMADA7/graph/2023-07-18/2023-07-18/daily>
- WHO. (2021). WHO global air quality guidelines.
- WHO. (2024a). Air pollution. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1

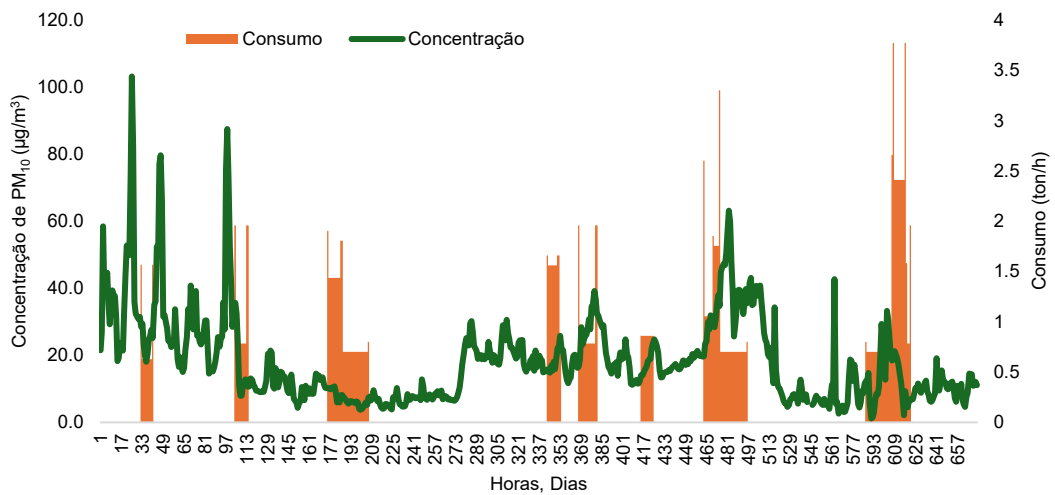
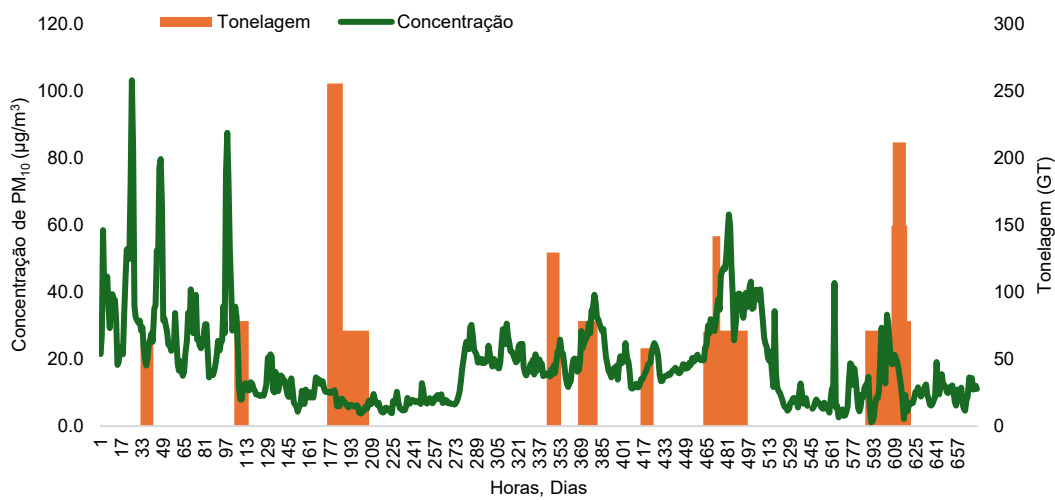
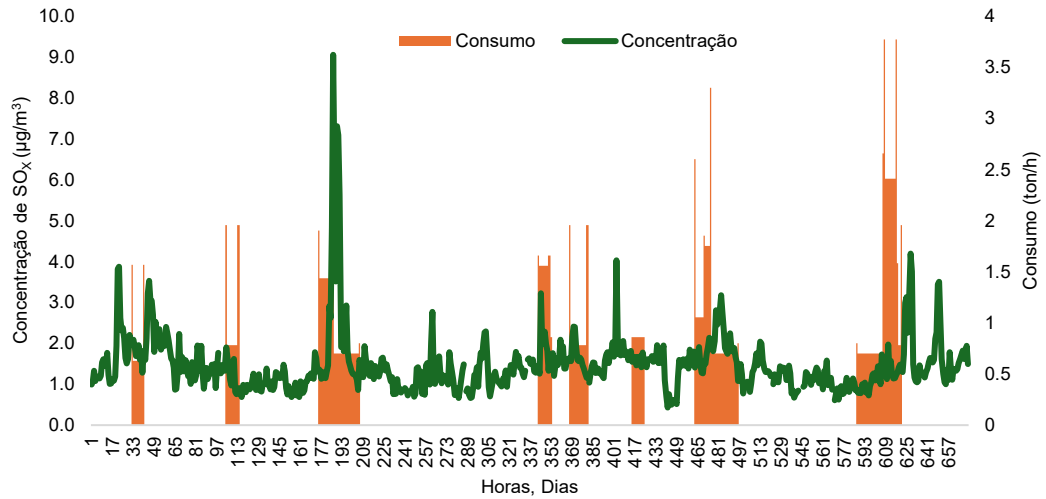
- WHO. (2024b). Air quality, energy and health. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>
- Witherbys. (2018). Guide to marine scrubbers (1st Edition). Witherby Publishing Group Ltd.
- Yau, P. S., Lee, S. C., & Ho, K. F. (2012). Speed Profiles for Improvement of Maritime Emission Estimation. *https://Home.Liebertpub.Com/Ees*, 29(12), 1076–1084. <https://doi.org/10.1089/EES.2011.0399>
- Zannis, T. C., Katsanis, J. S., Christopoulos, G. P., Yfantis, E. A., Papagiannakis, R. G., Pariotis, E. G., Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., & Vallis, A. G. (2022). Marine Exhaust Gas Treatment Systems for Compliance with the IMO 2020 Global Sulfur Cap and Tier III NO_x Limits: A Review. <https://doi.org/10.3390/en15103638>
- Zhang, Y., & Stripple, H. (2019). Scrubbers: Closing the loop Activity 3: Task 4 Evaluation of exhaust gas scrubber systems for ship applications from a system perspective. www.ivl.se
- Zhao, F., Yang, W., Tan, W. W., Chou, S. K., & Yu, W. (2015). An Overall Ship Propulsion Model for Fuel Efficiency Study. *Energy Procedia*, 75, 813–818. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.07.139>
- Zis, T. P. V. (2019). Green Ports. Sustainable Shipping: A Cross-Disciplinary View, 407–432. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04330-8_12

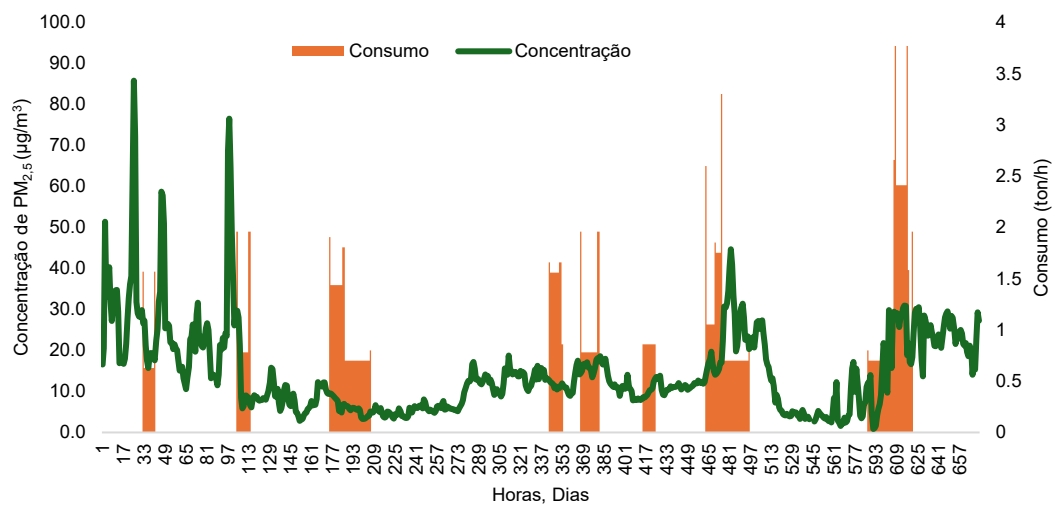
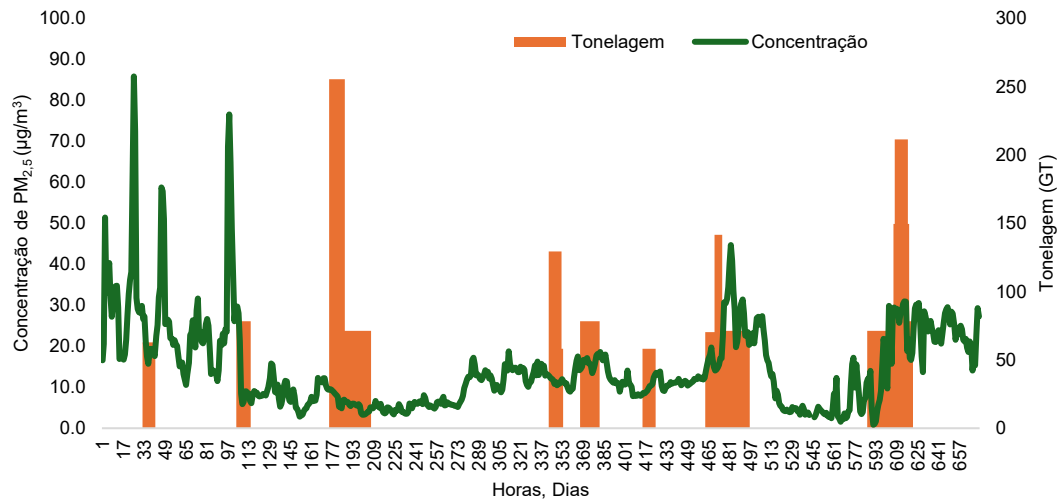
Anexos

Anexo I – Variação da concentração dos diferentes poluentes ao longo do mês de fevereiro segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “Estação-Física”

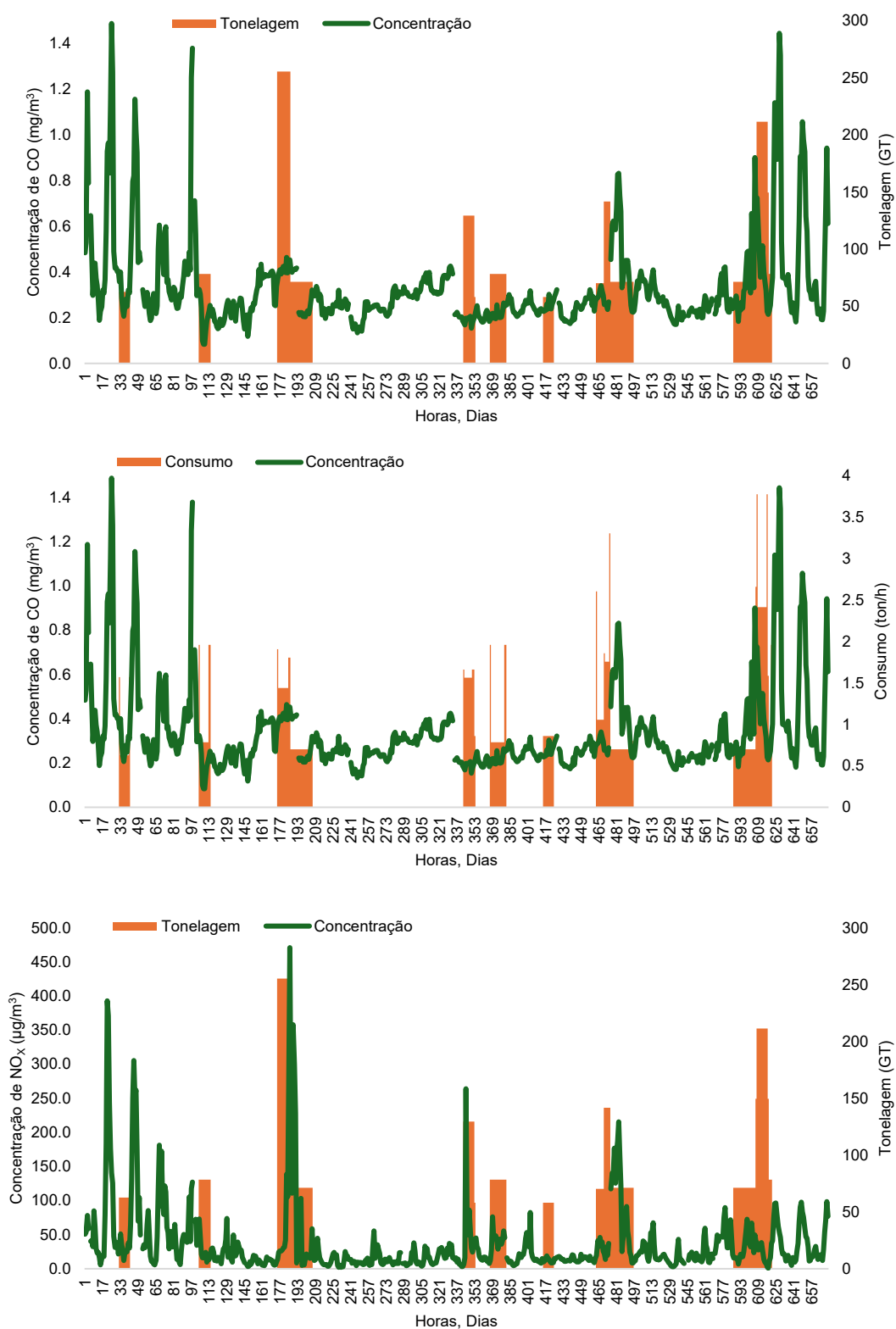


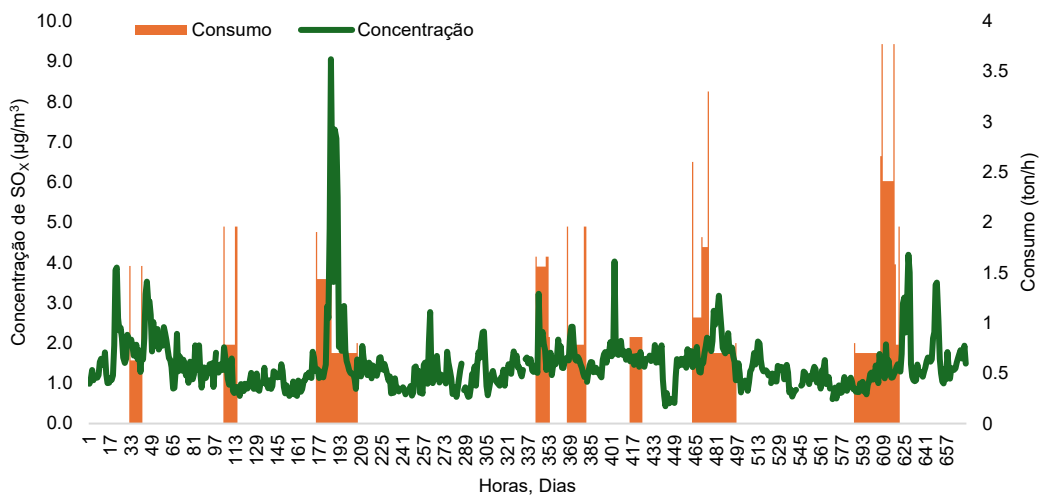
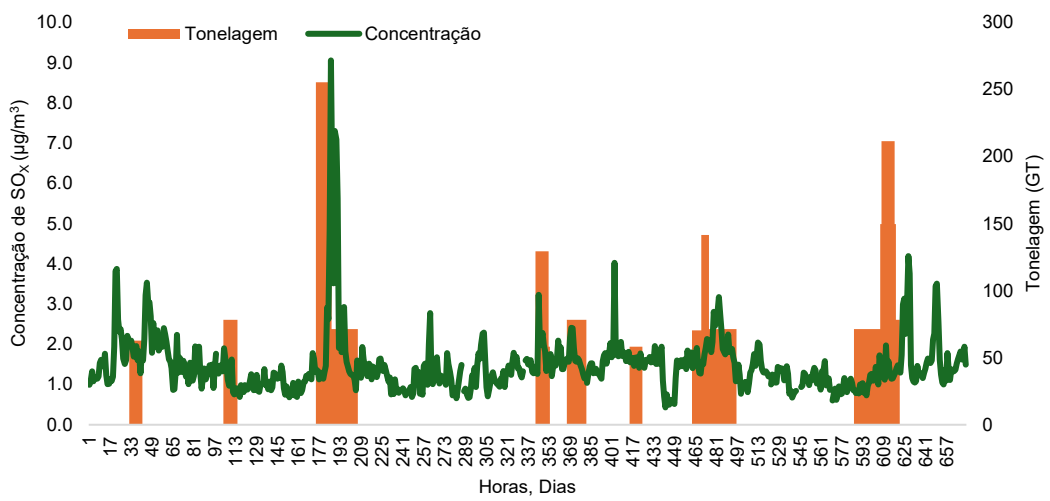
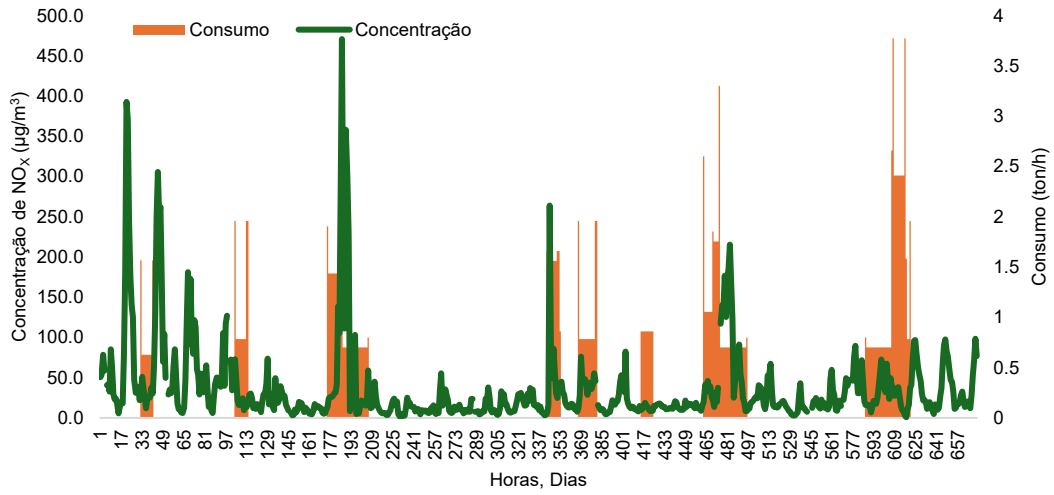


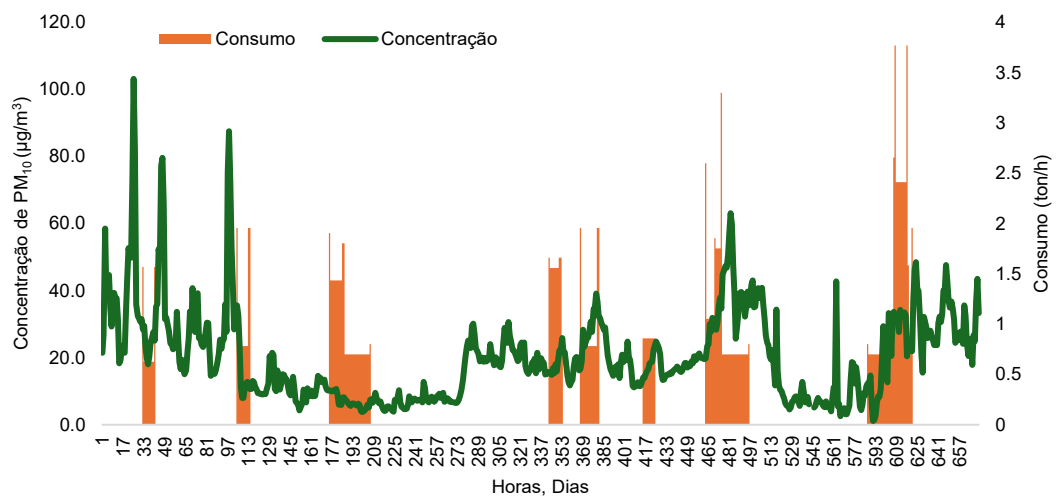
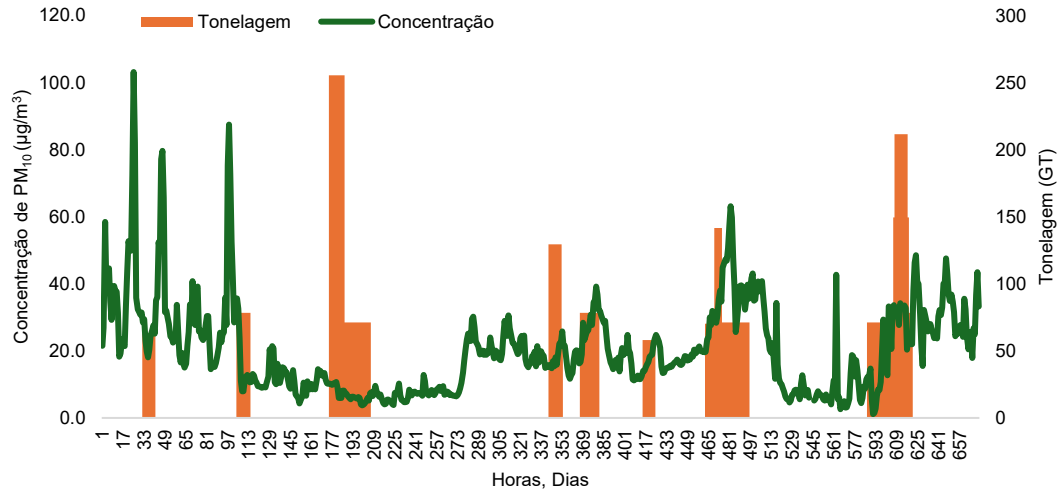


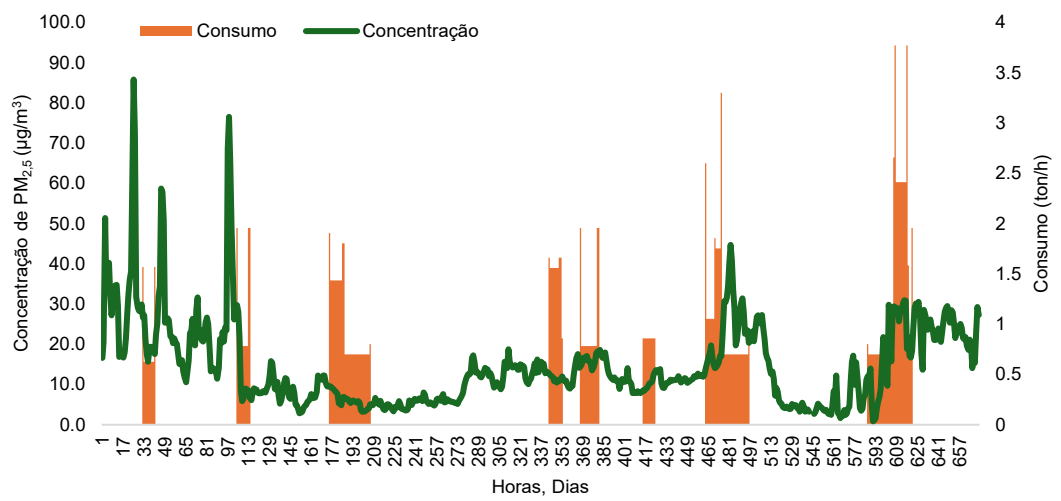
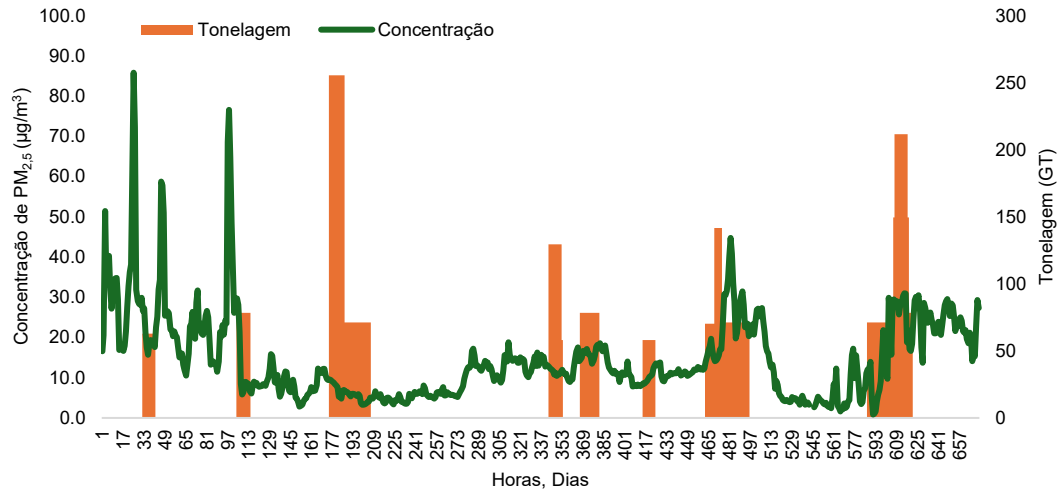


Anexo II – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de fevereiro segundo o consumo e a tonelage dos navios na “P1-Móvel”

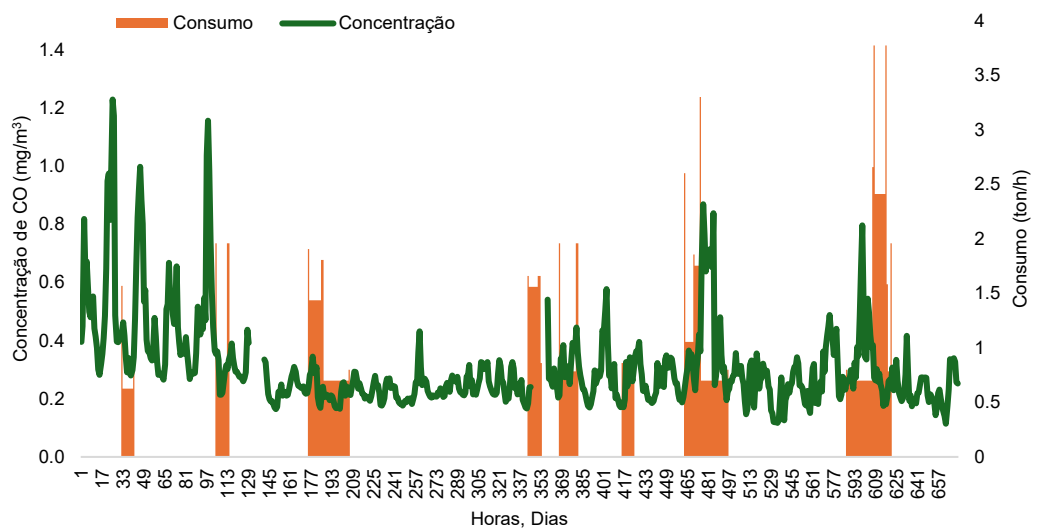
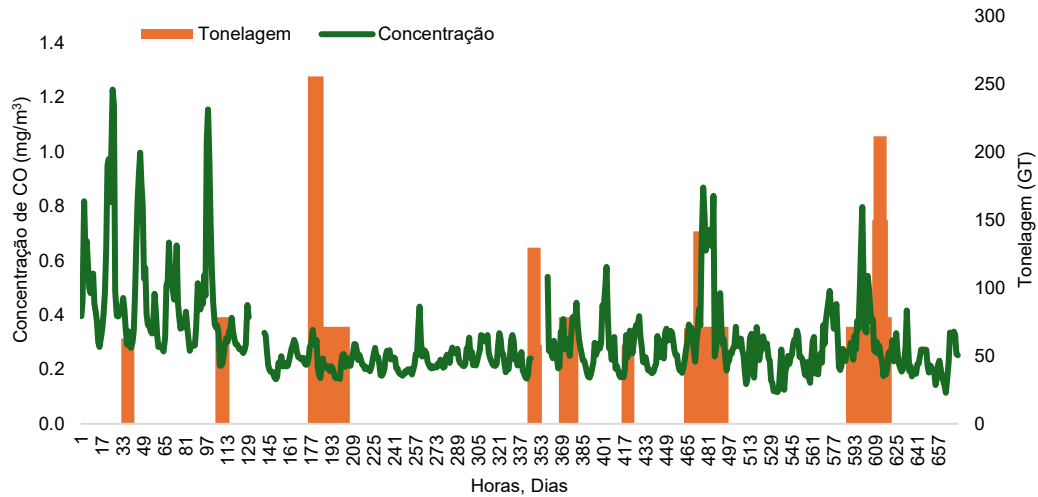


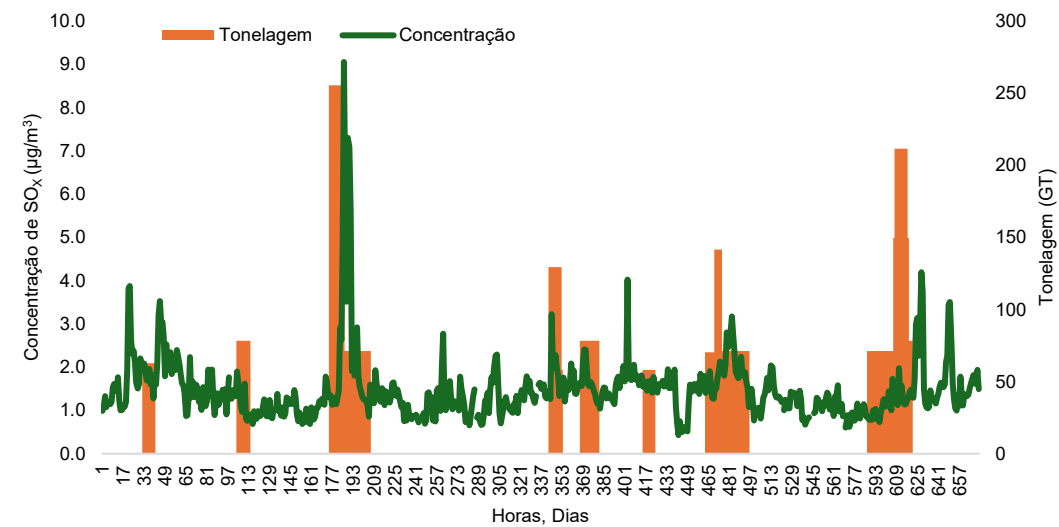
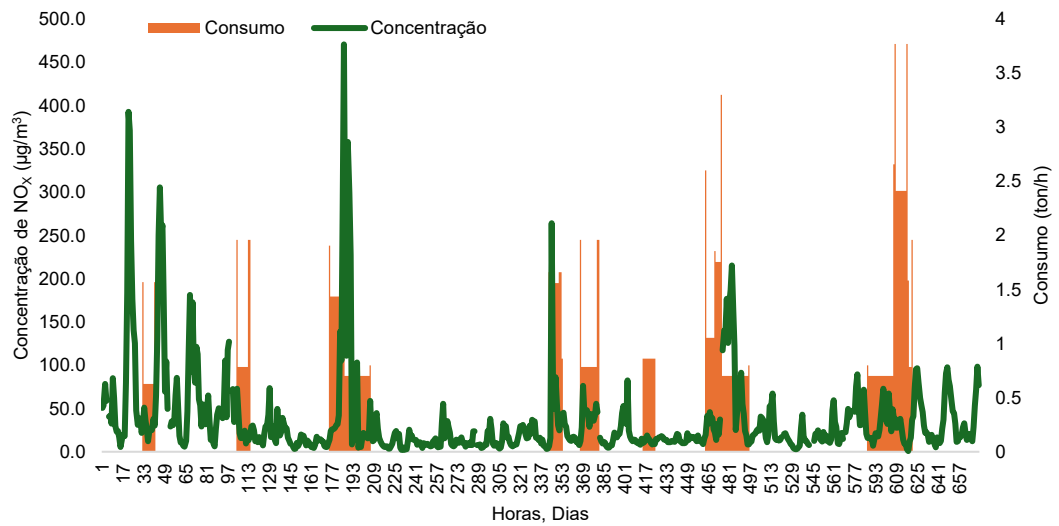
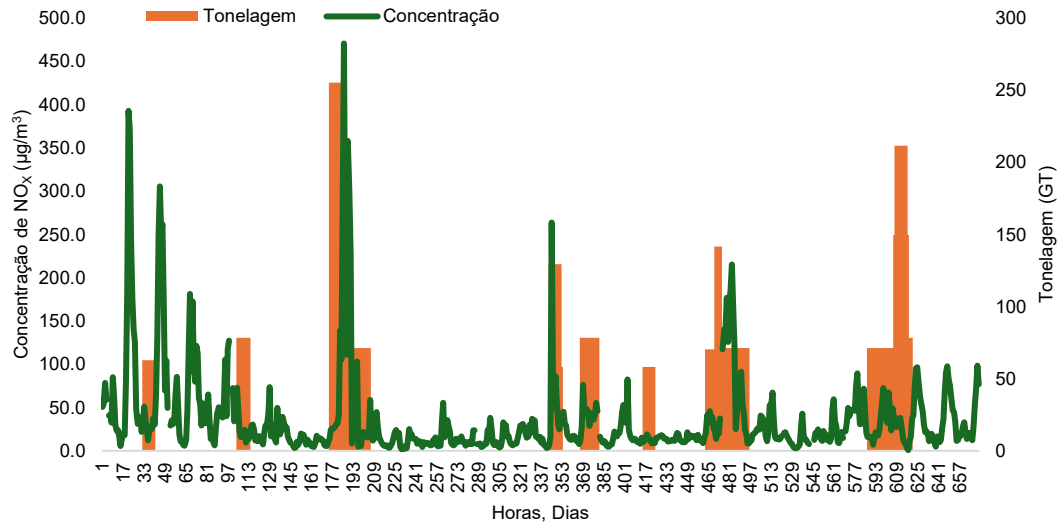


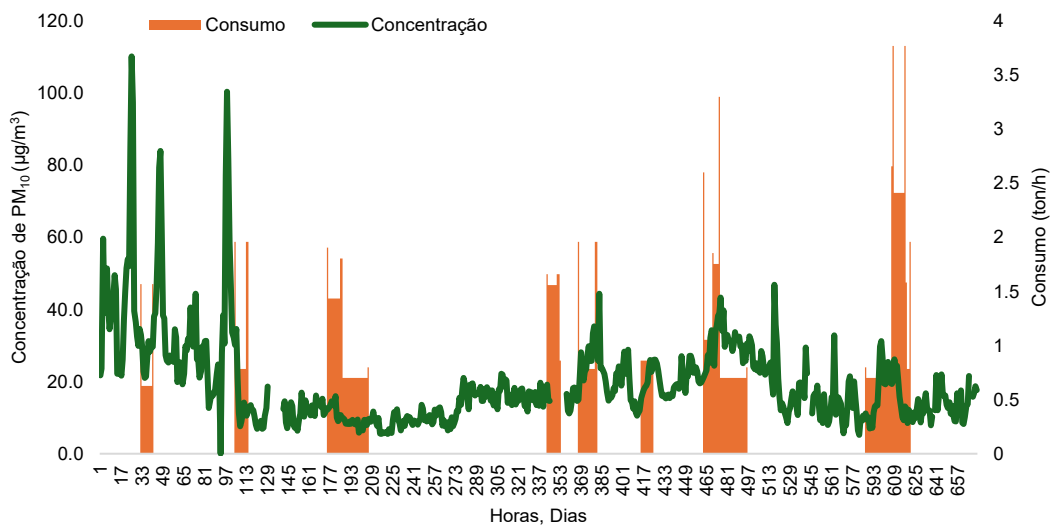
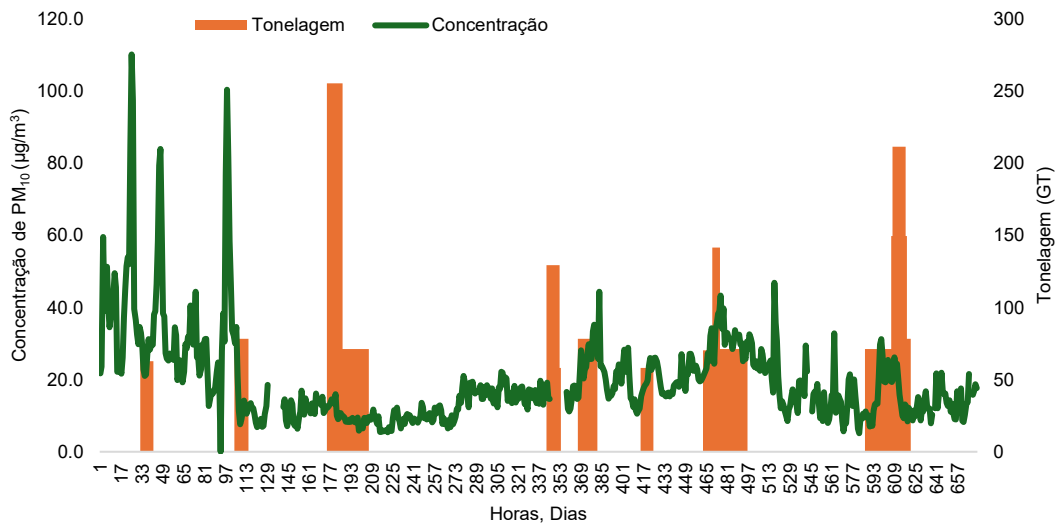
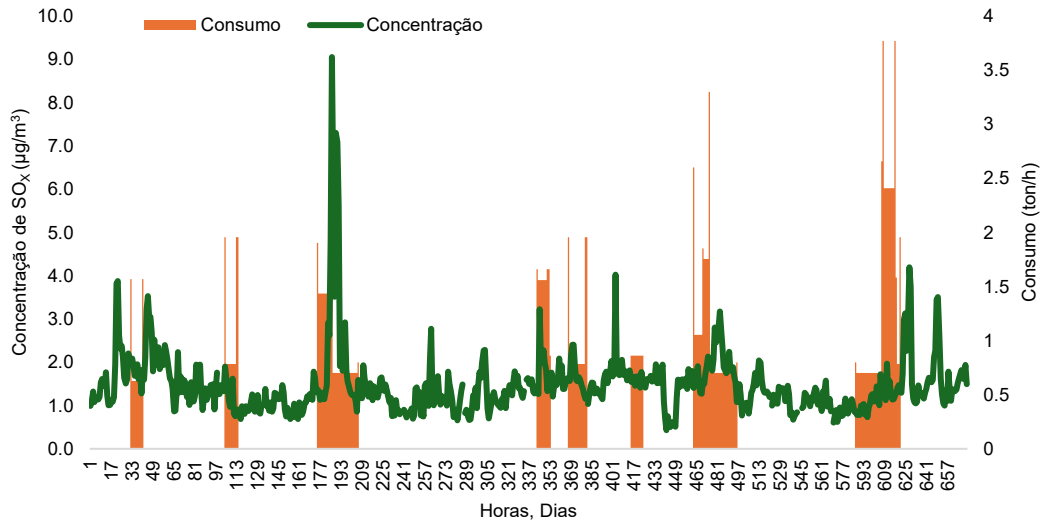


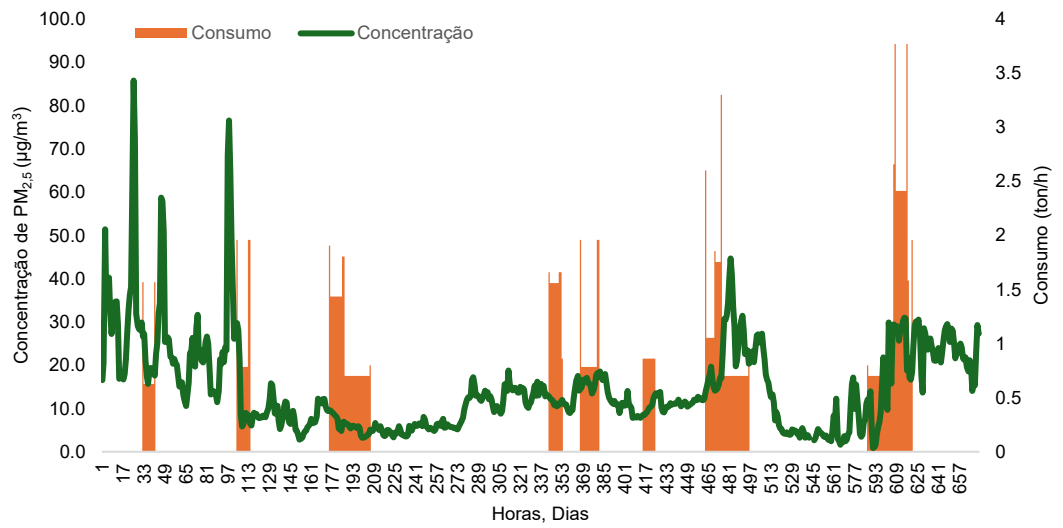
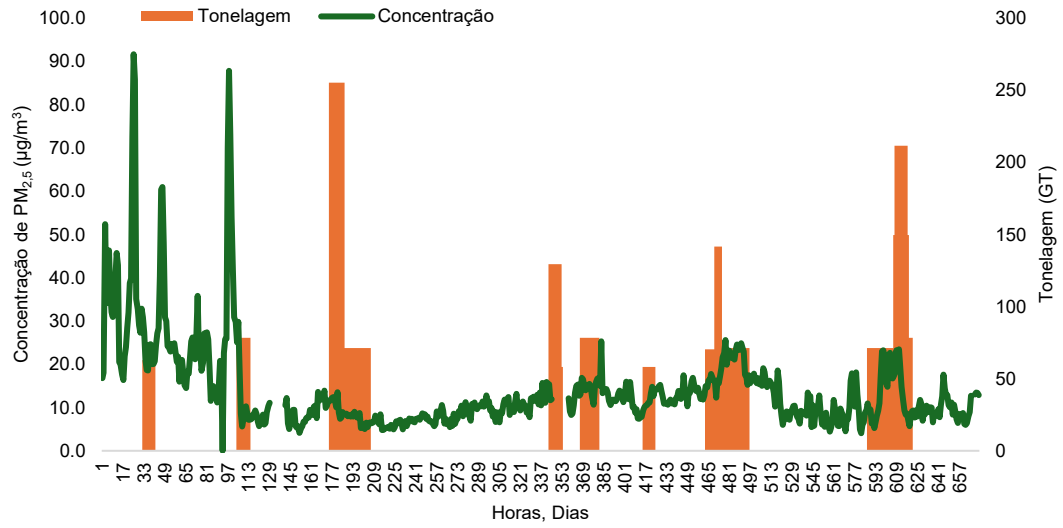


Anexo III – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de fevereiro segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P2-Móvel”

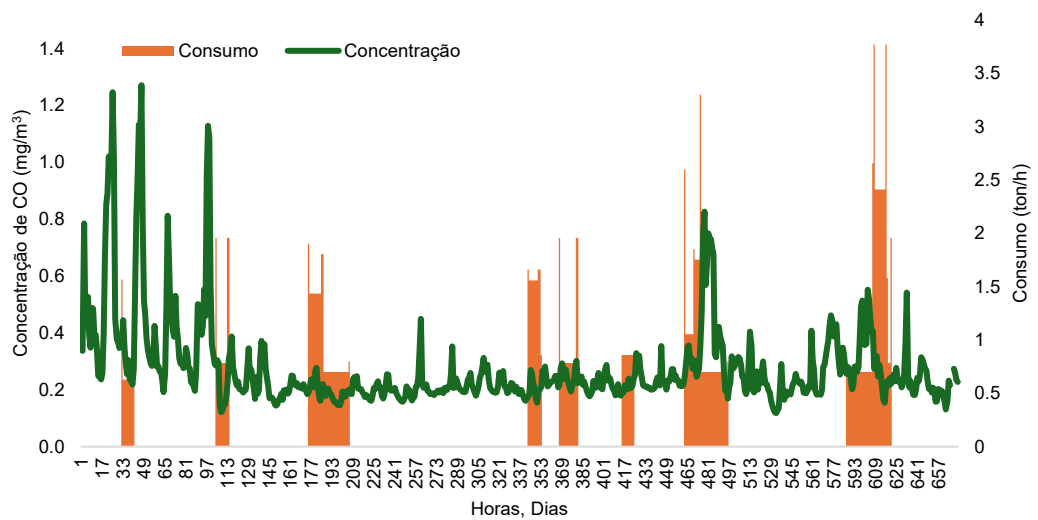
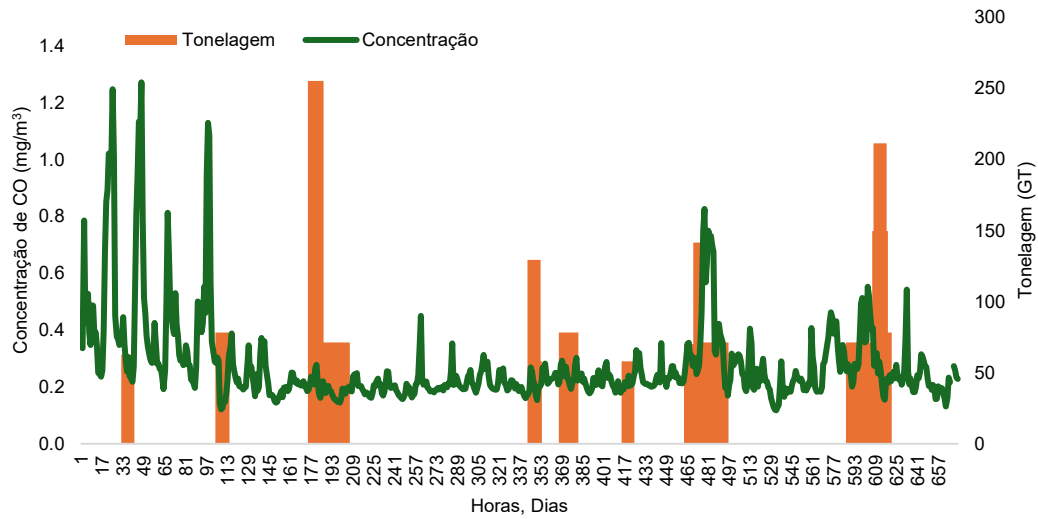


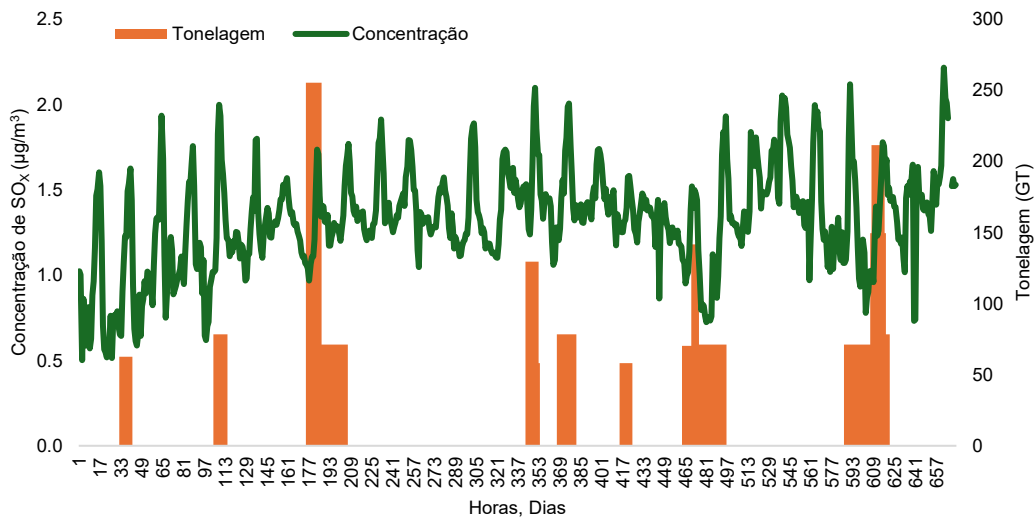
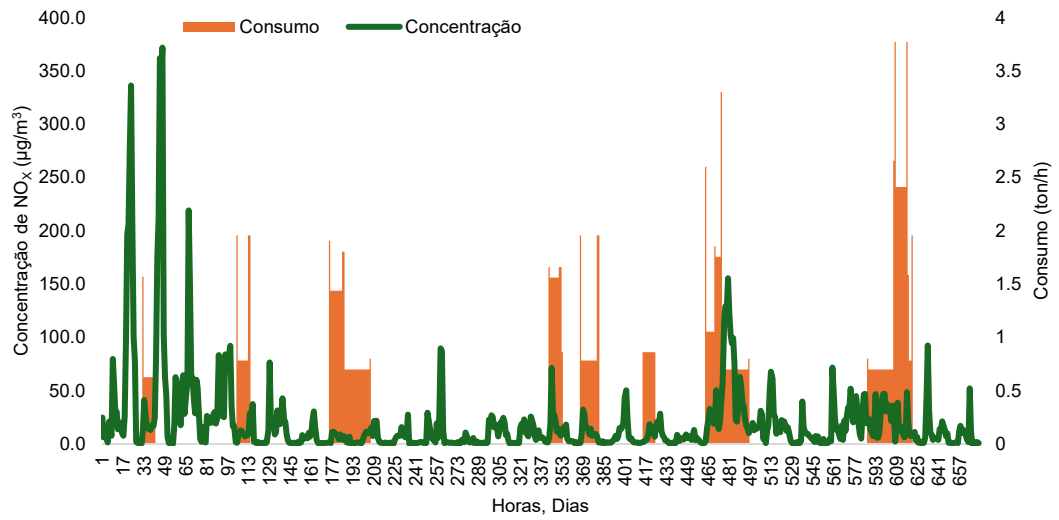
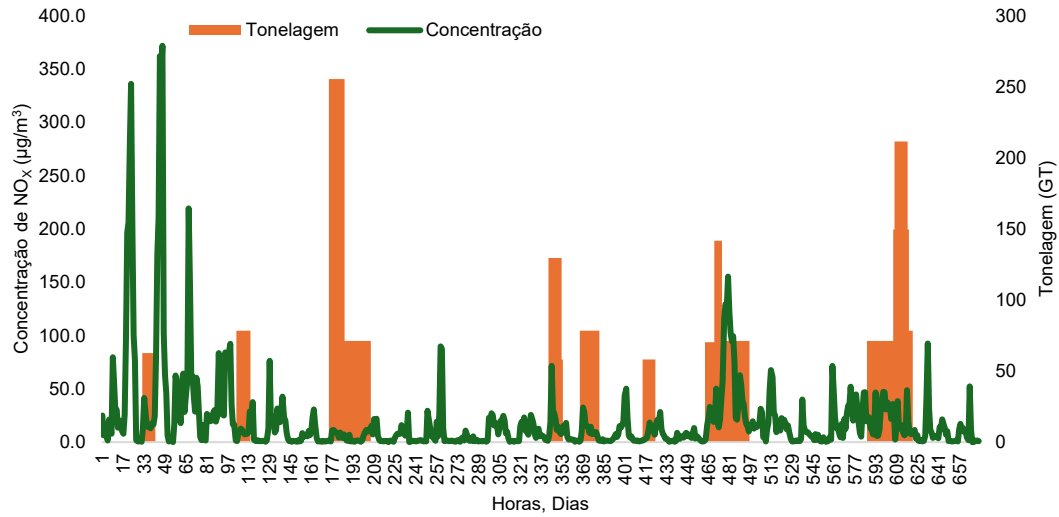


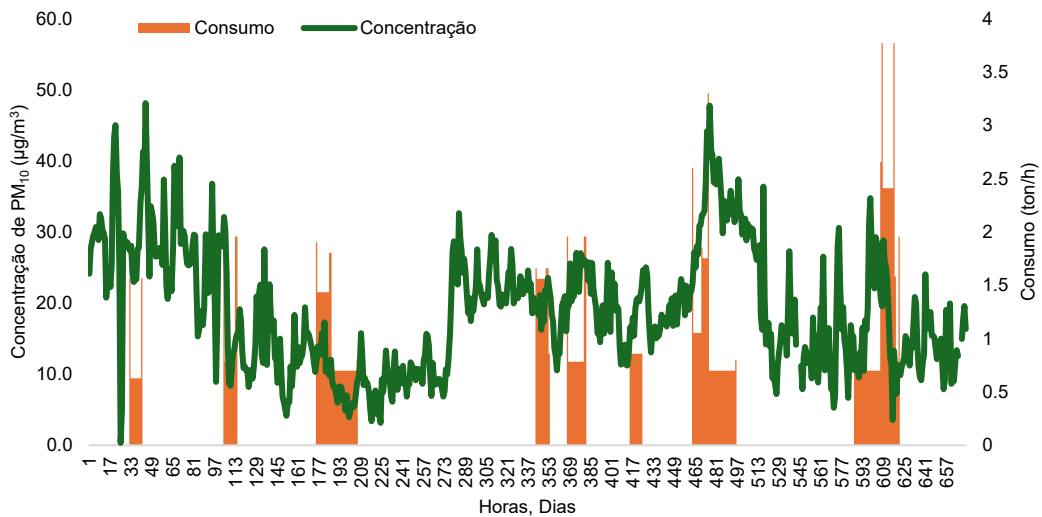
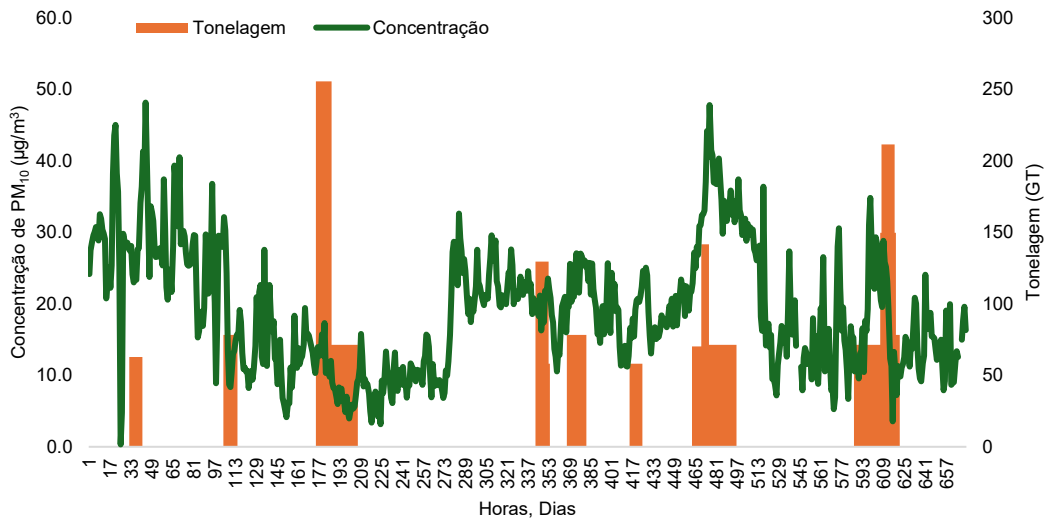
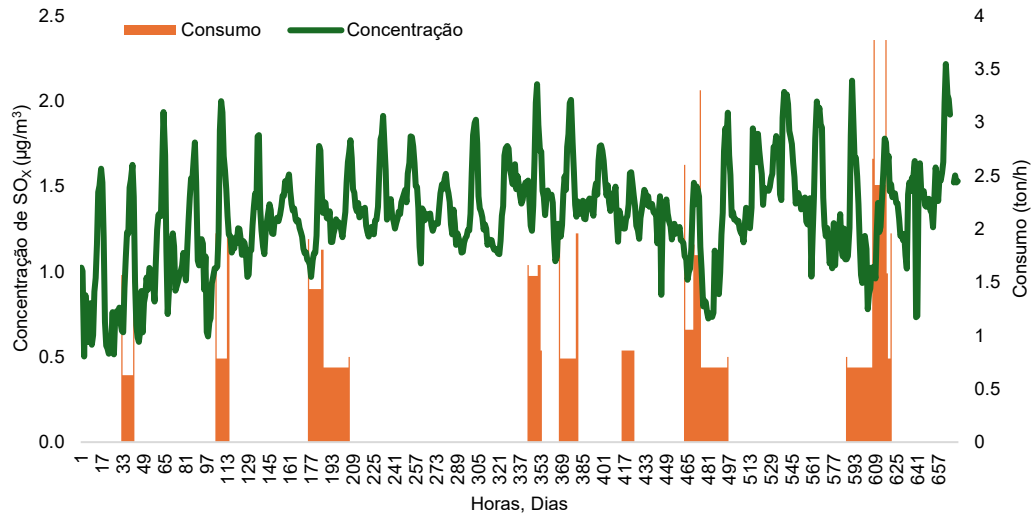


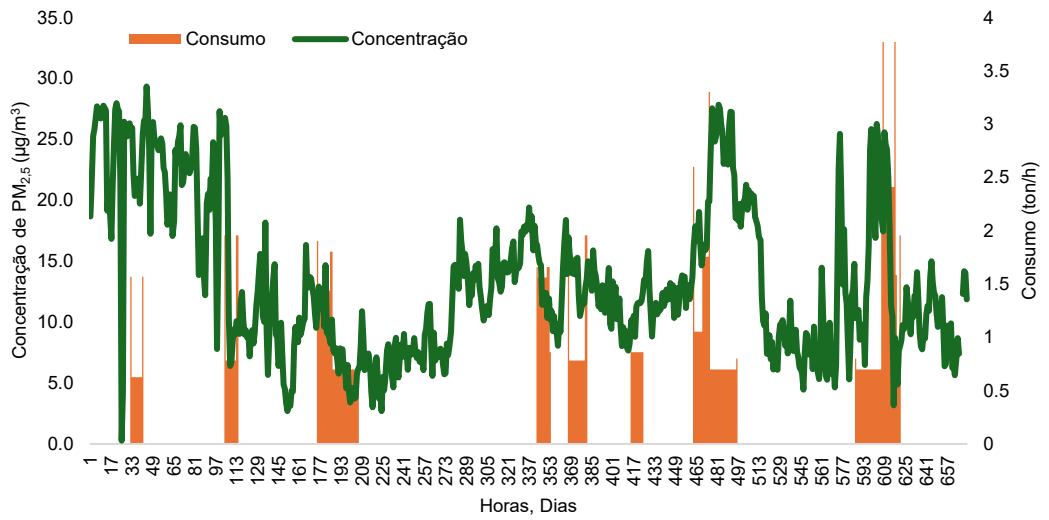
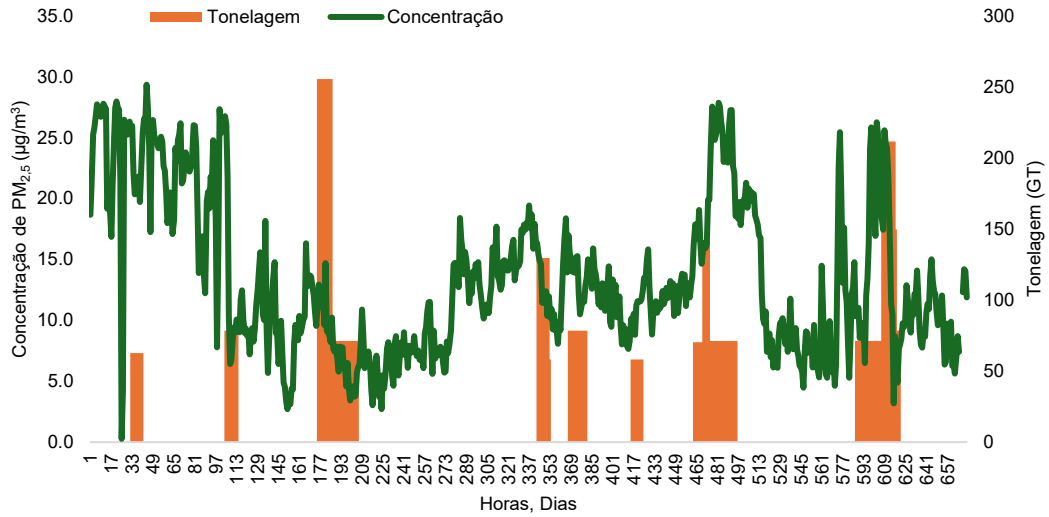


Anexo IV – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de fevereiro segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P3-Móvel”

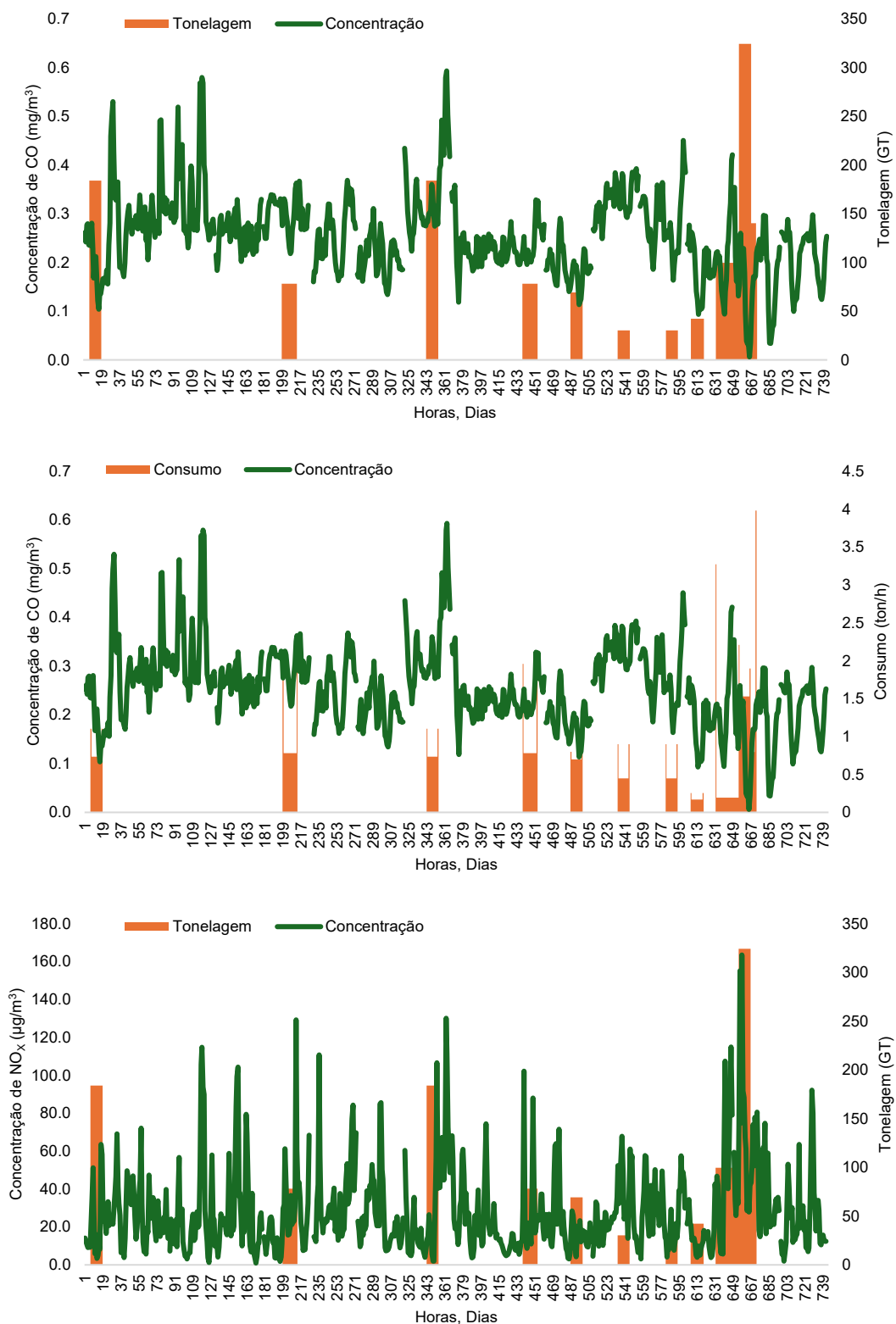


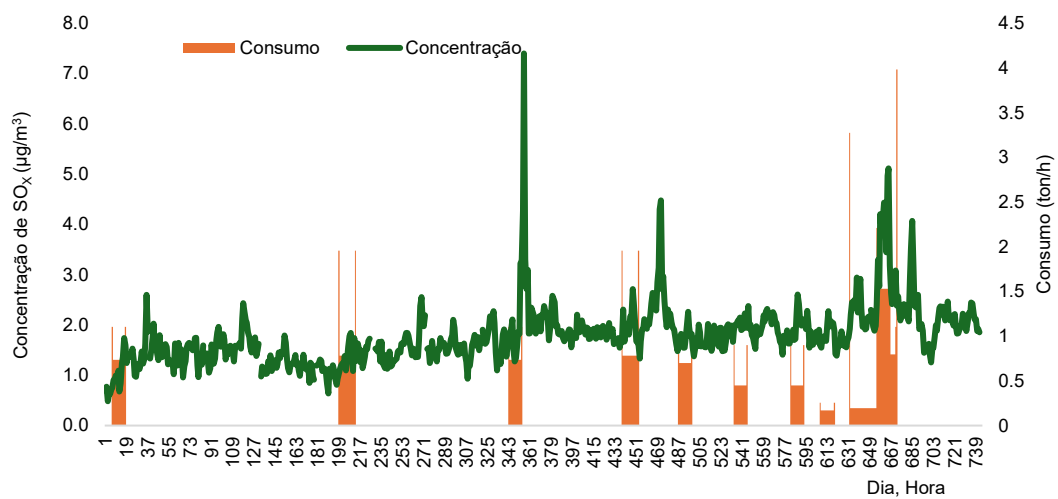
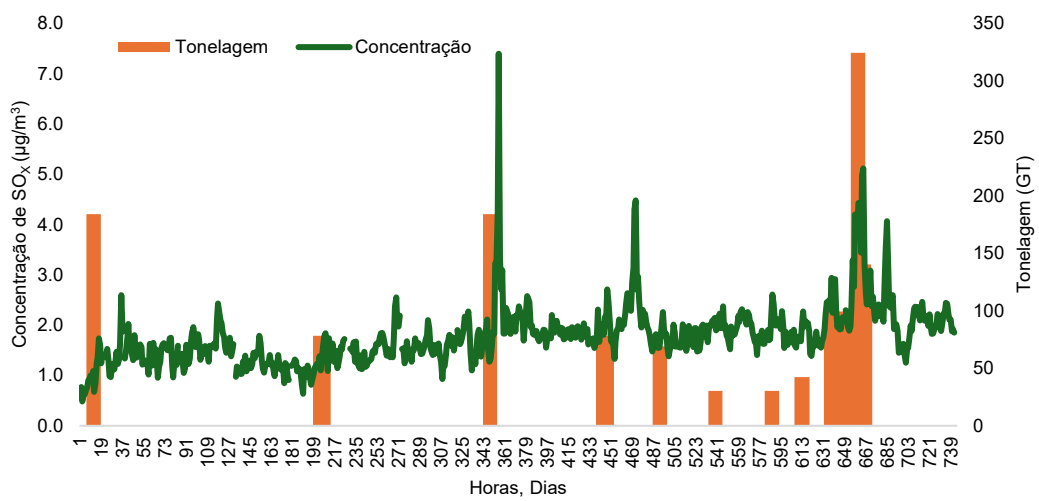
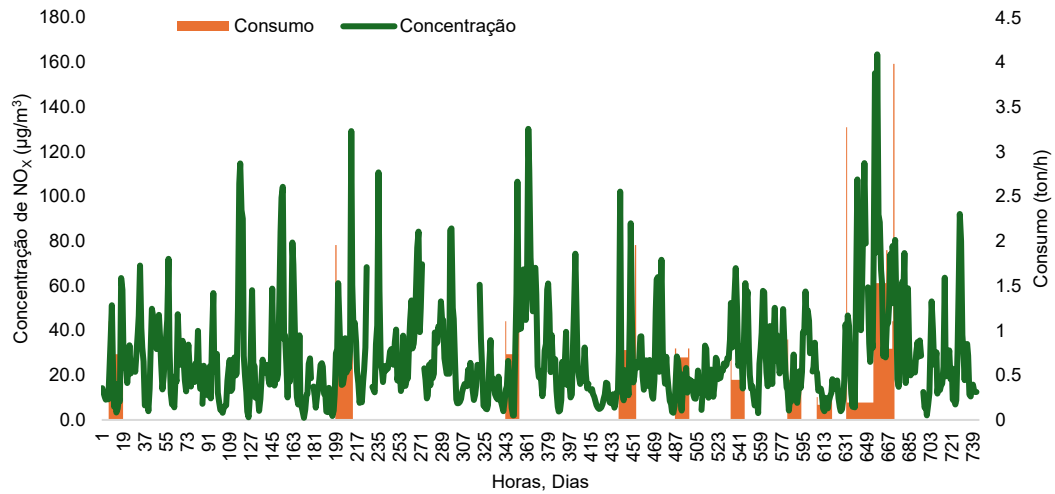


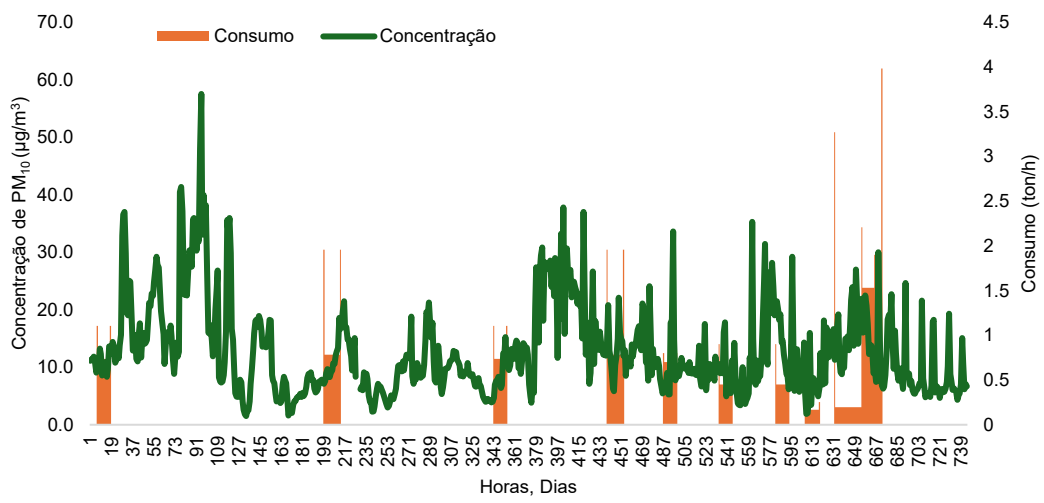
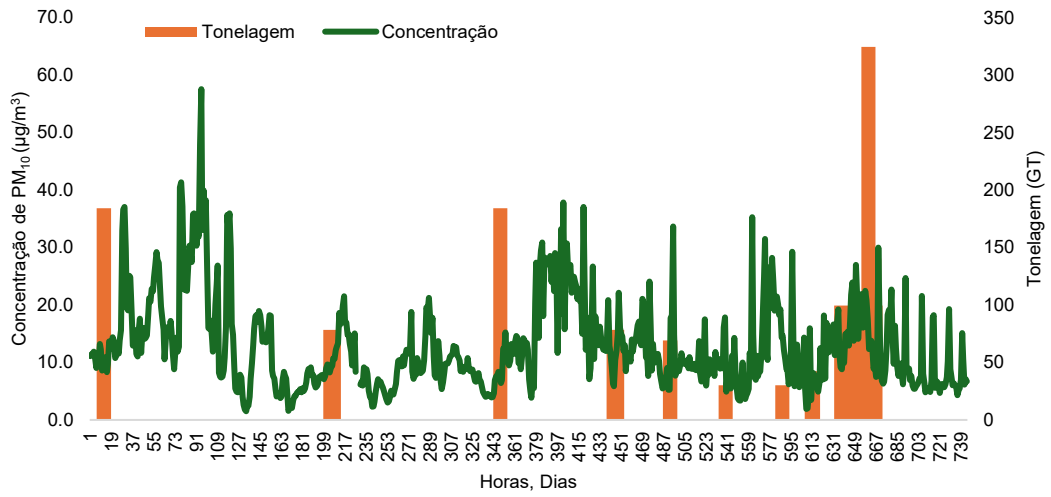


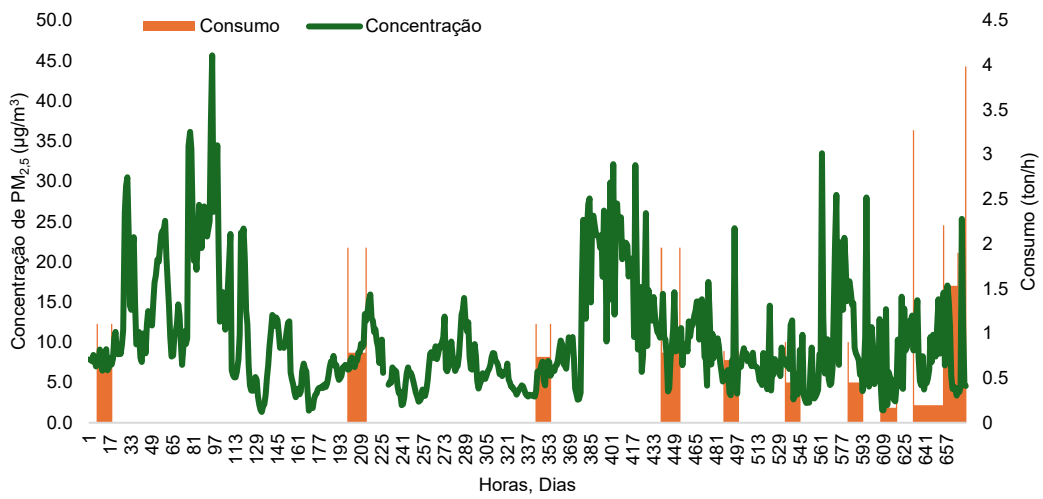
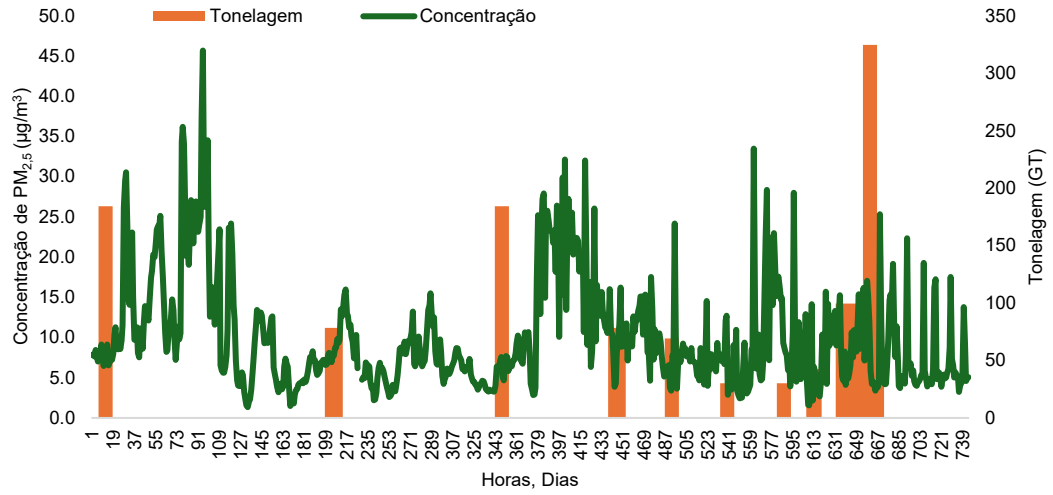


Anexo V – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de março segundo o consumo e a tonelagem dos navios no sensor “Estação-Física”

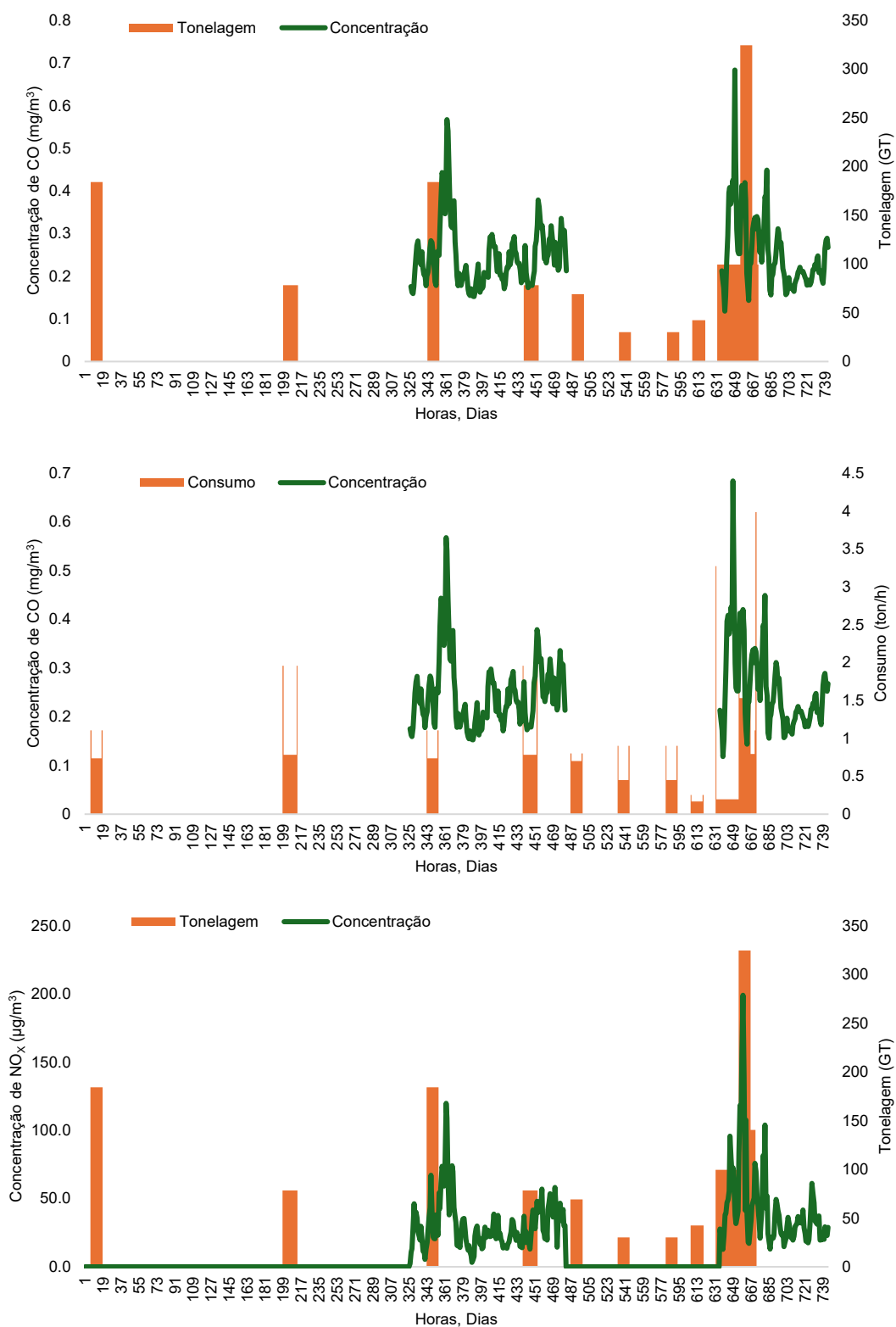


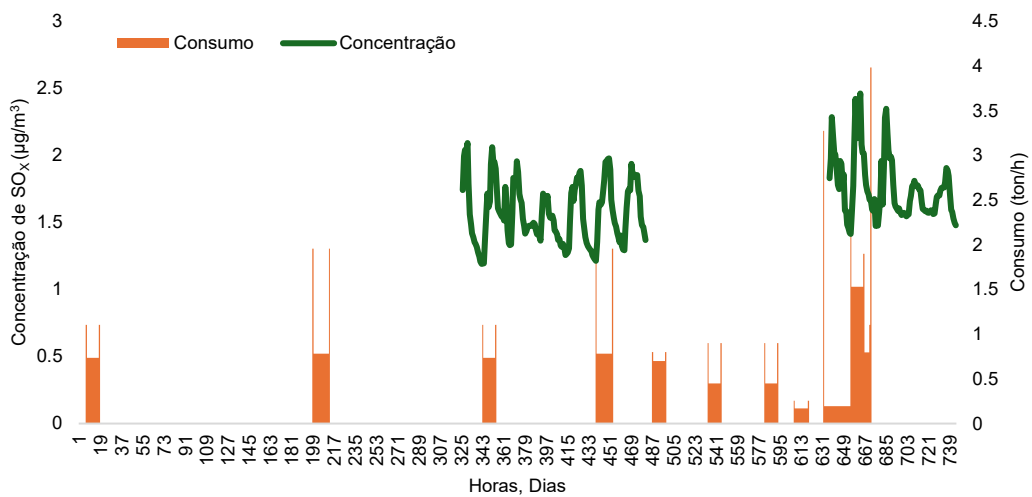
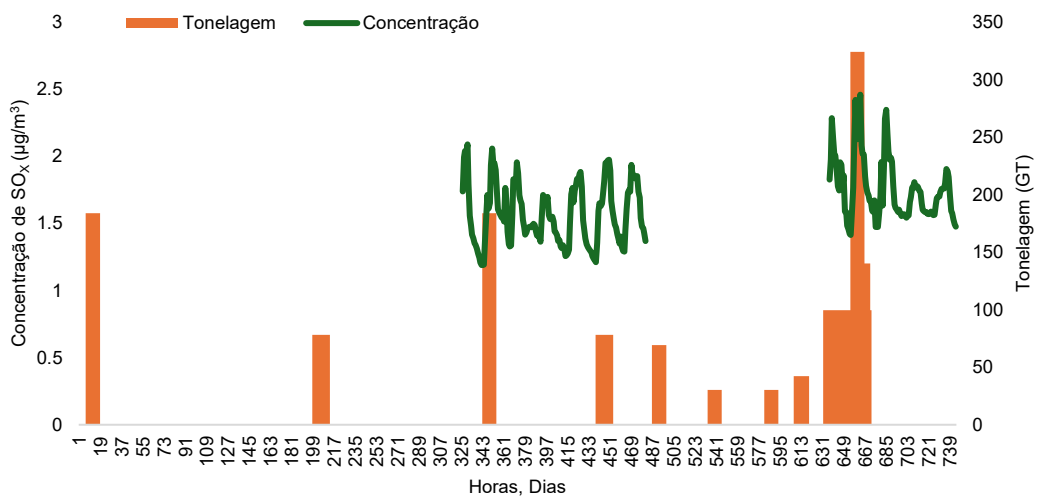
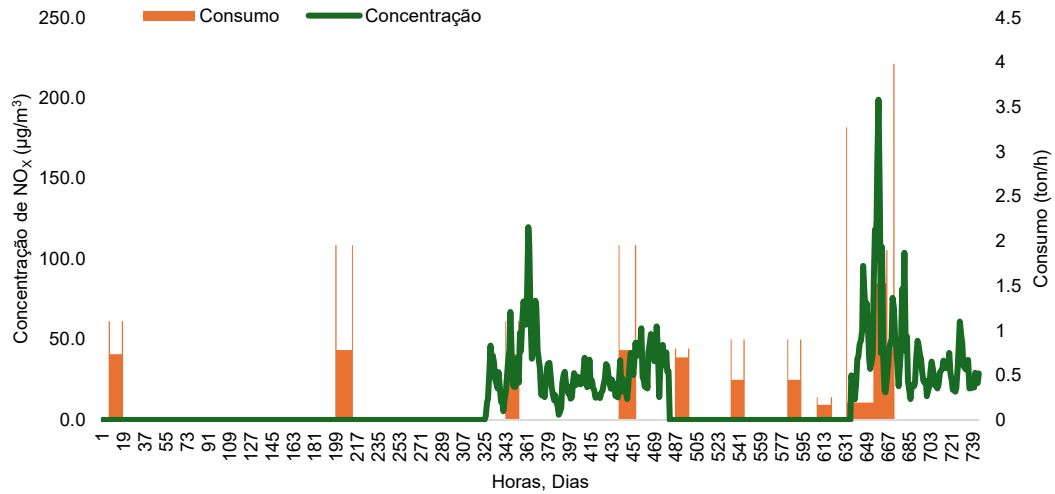


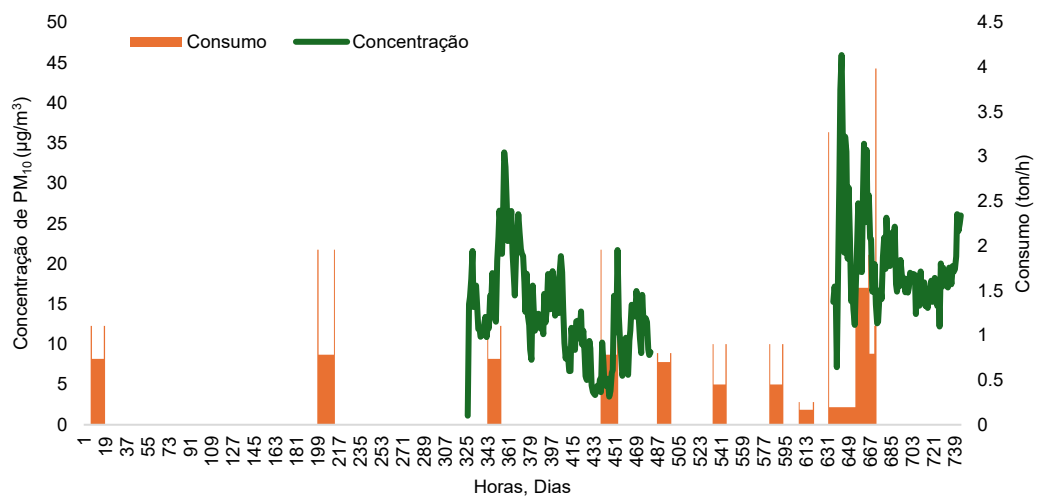
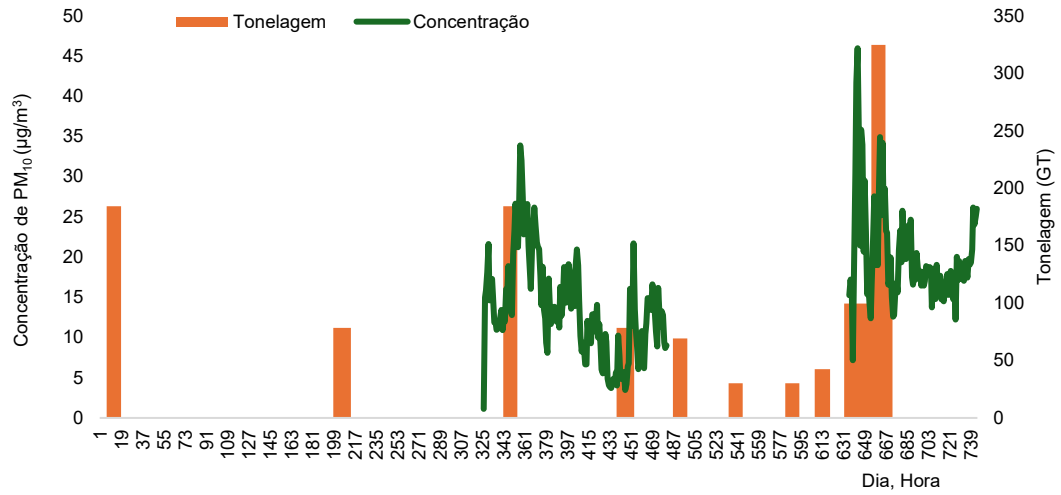


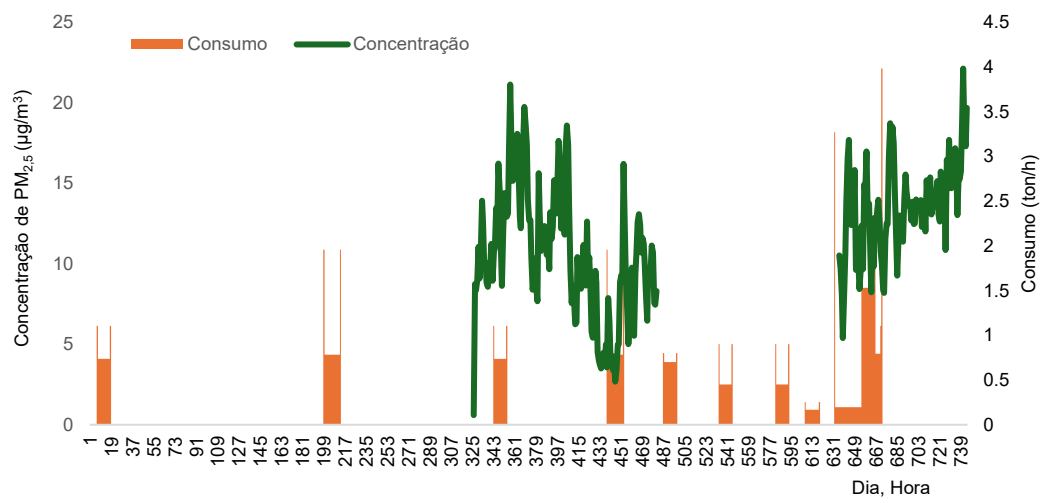
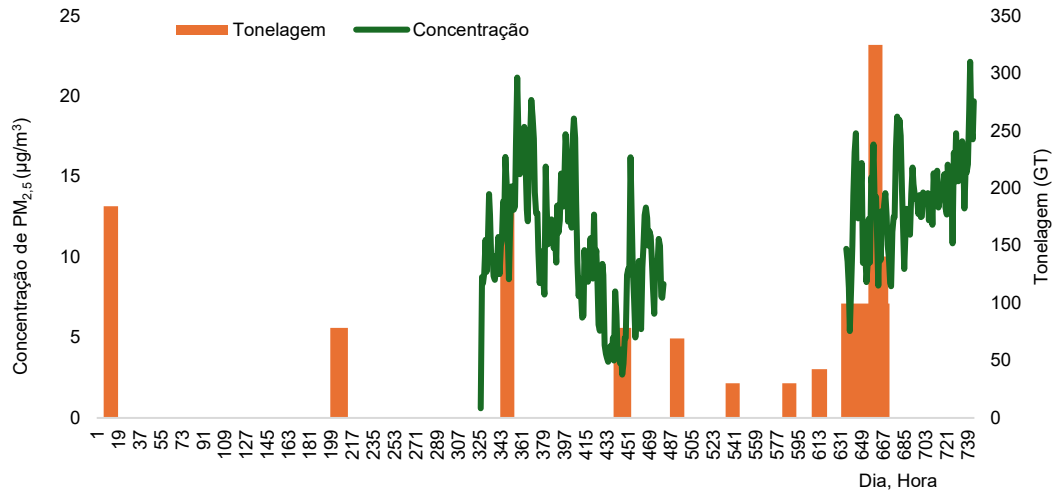


Anexo VI – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de março segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P1-Móvel”

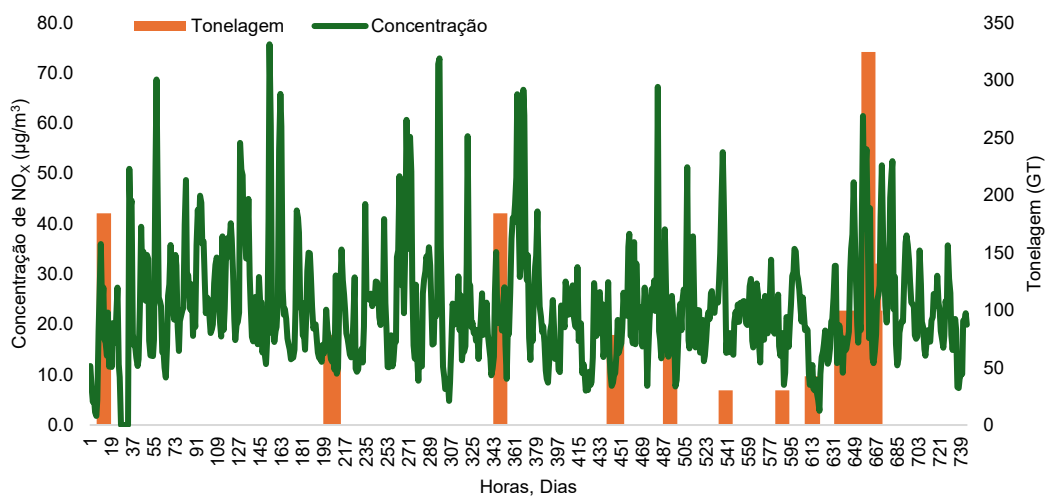
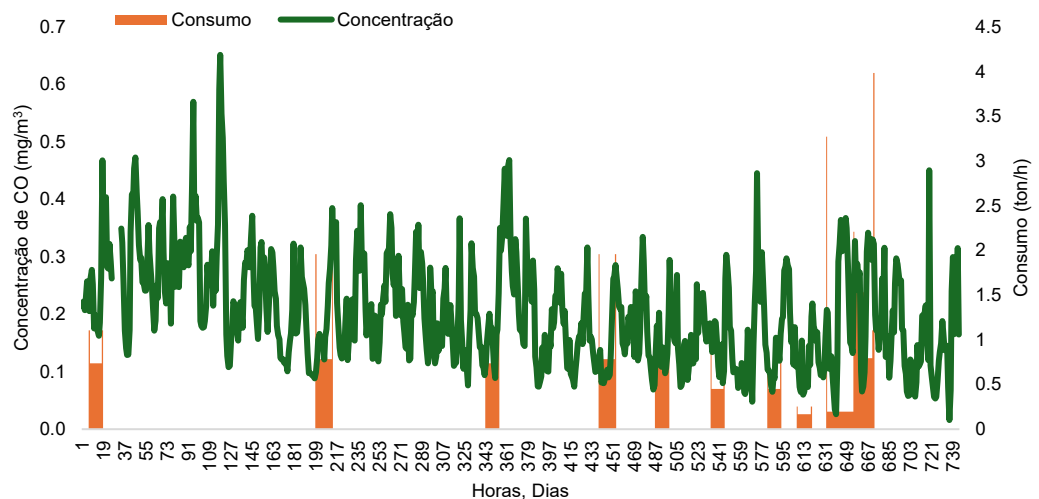
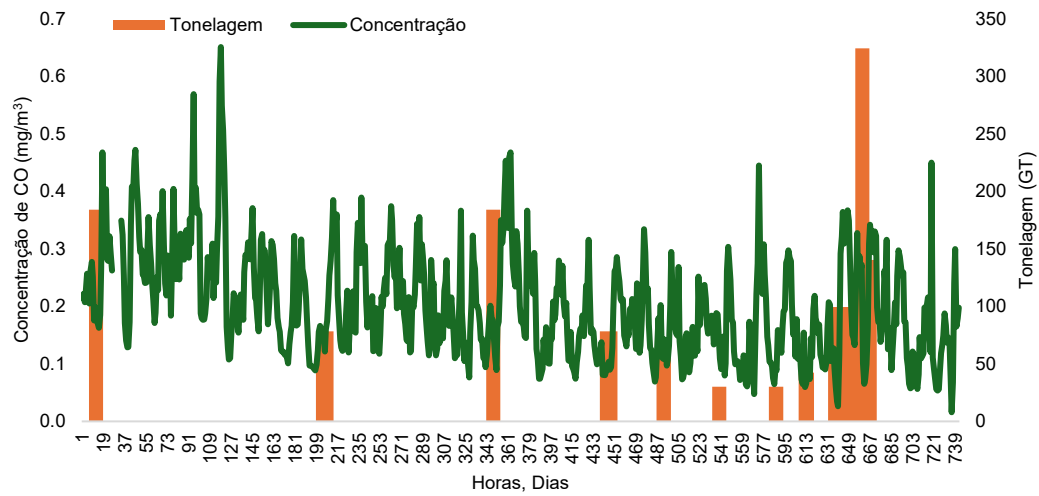


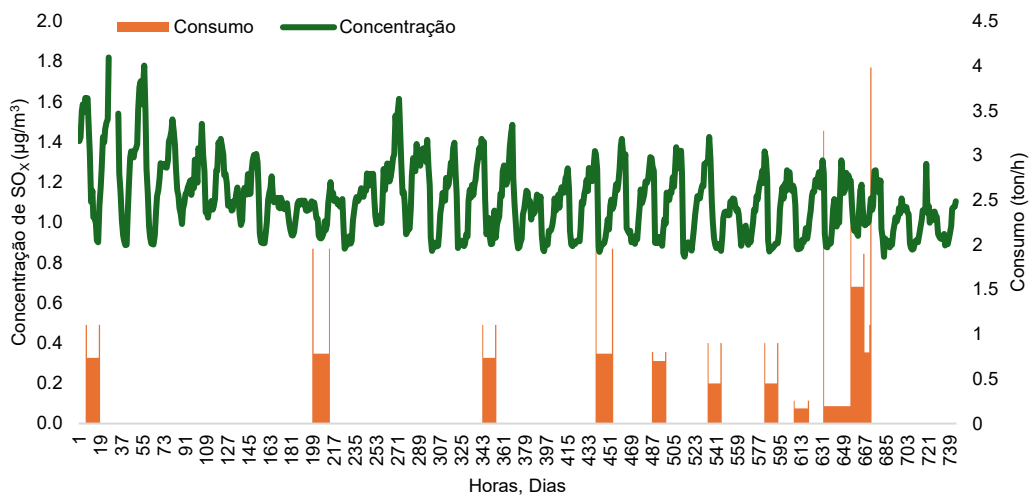
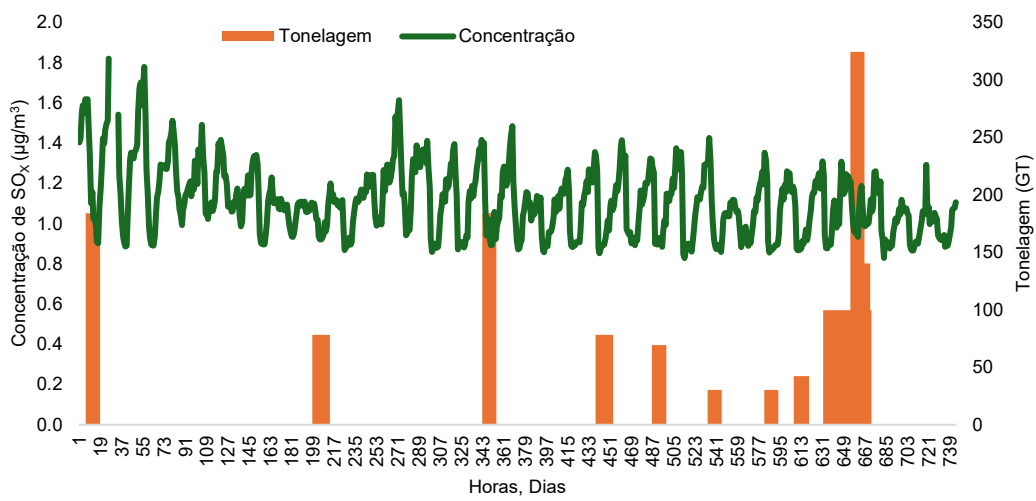
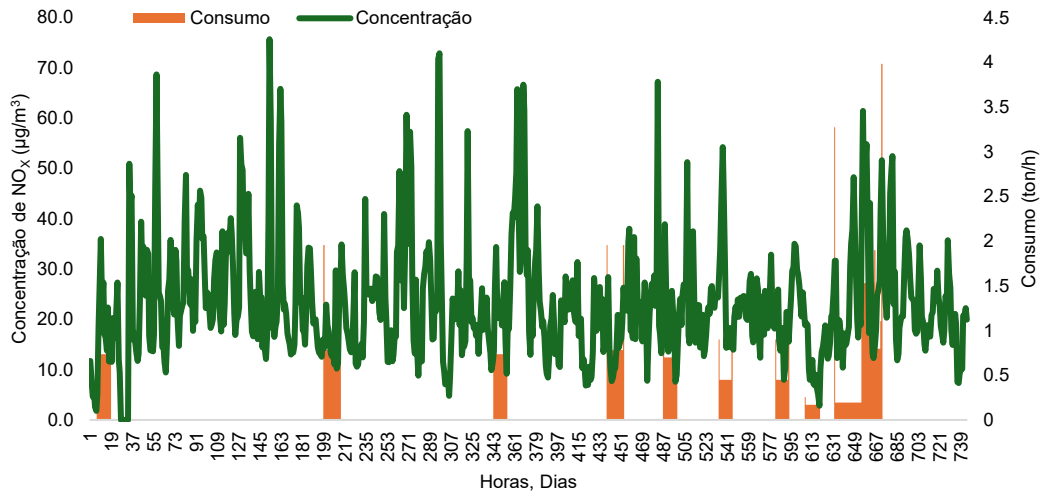


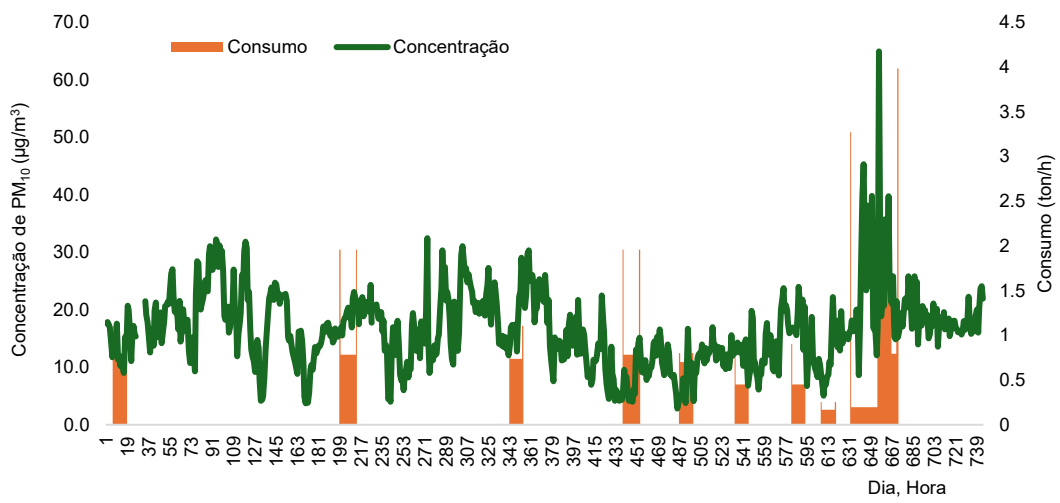
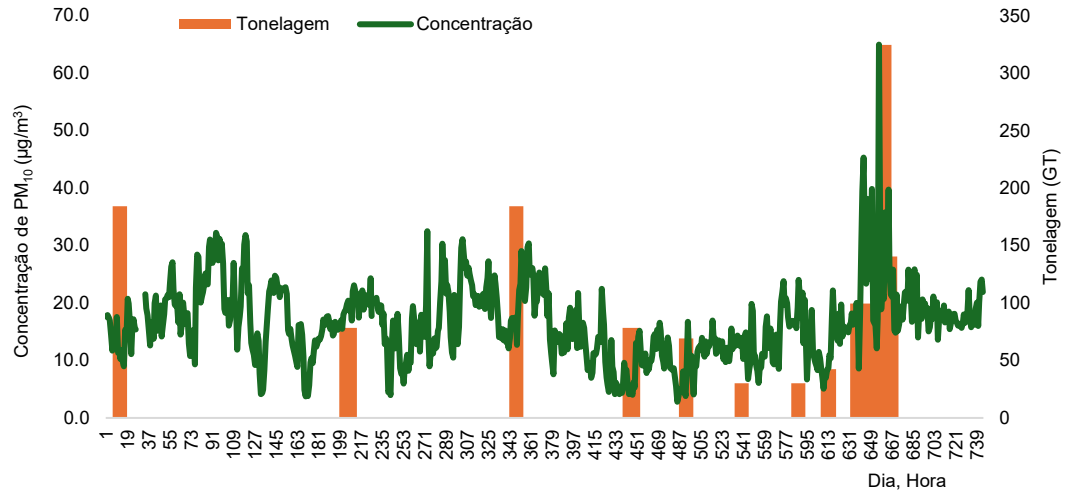


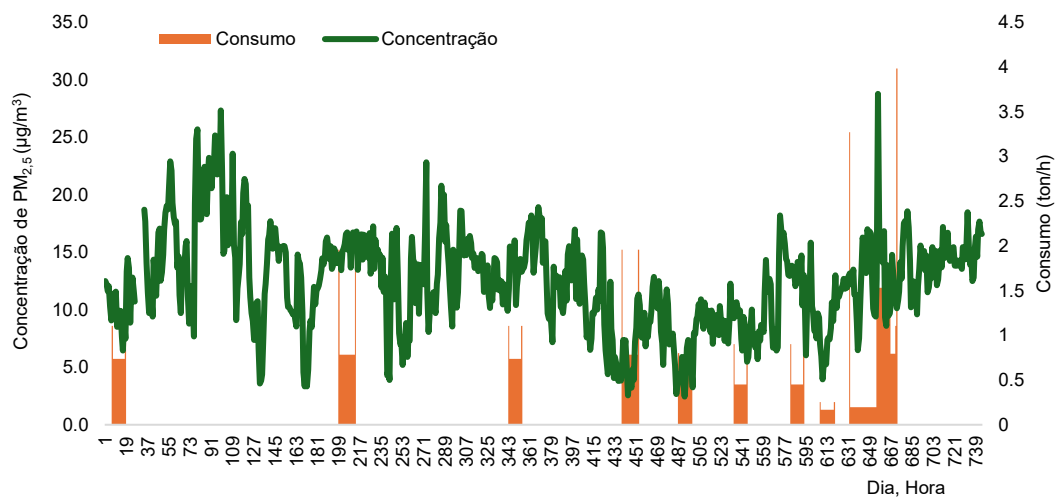
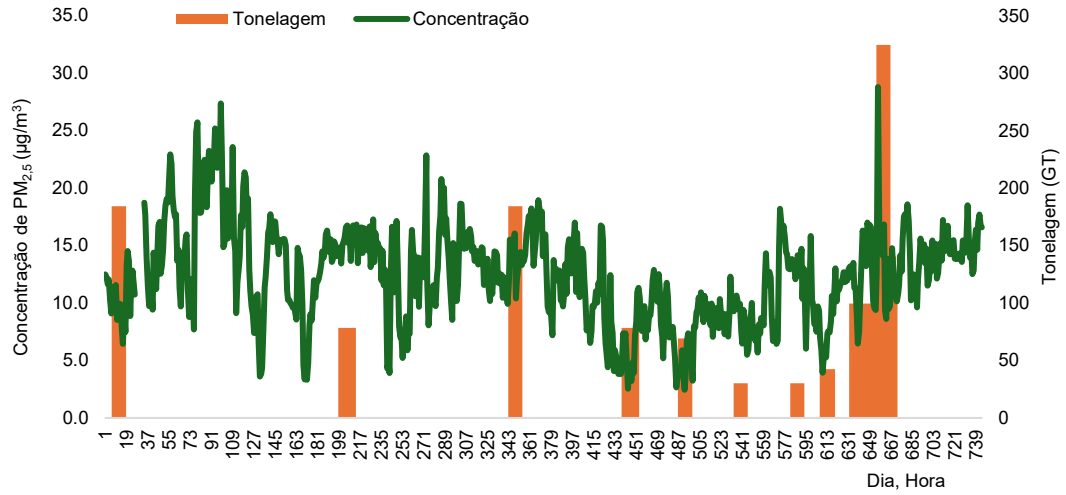


Anexo VII – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de março segundo o consumo e a tonelage dos navios na “P2-Móvel”

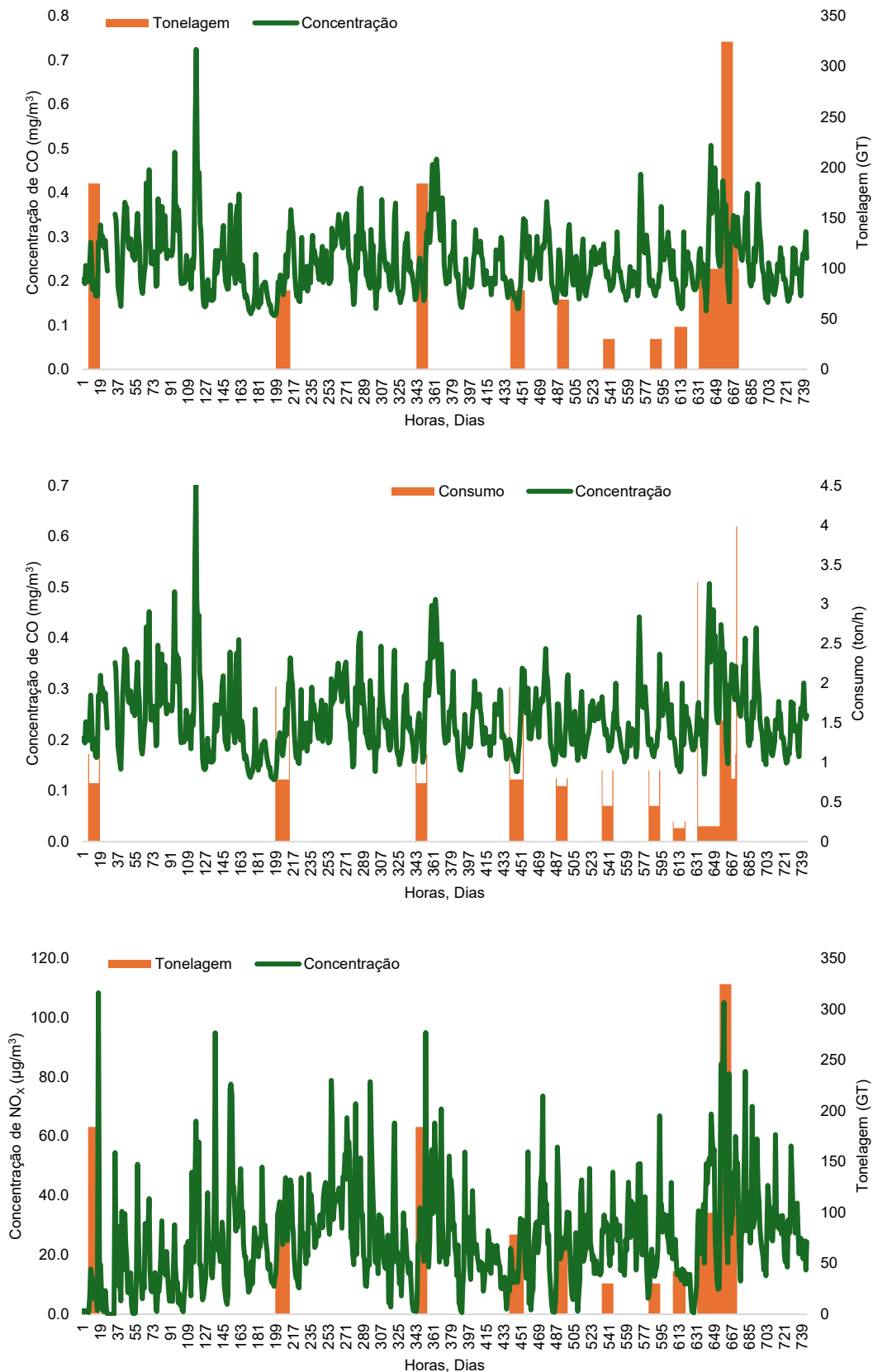


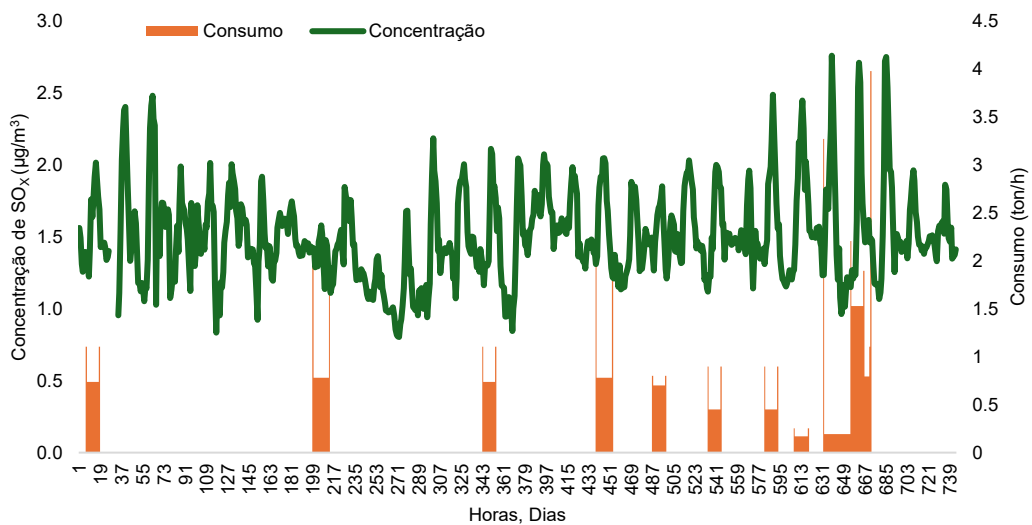
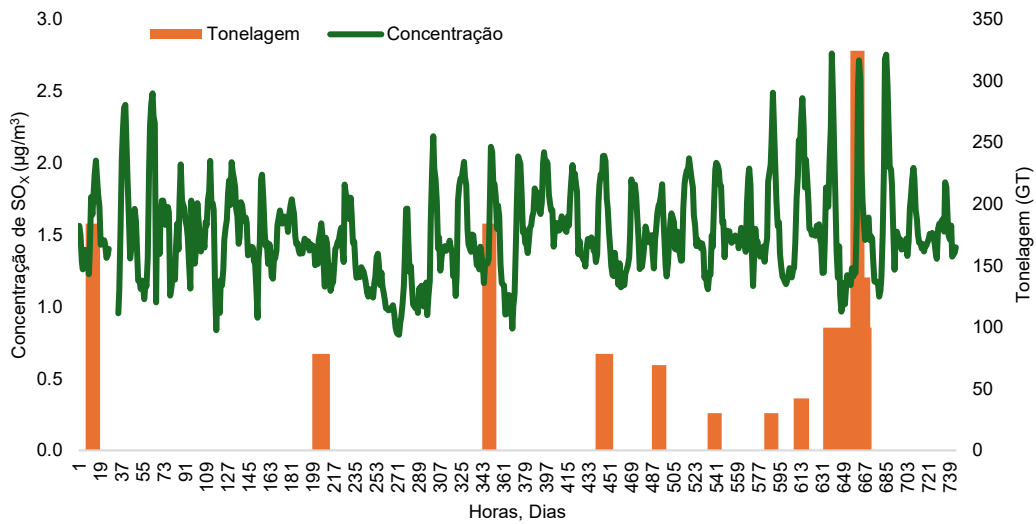
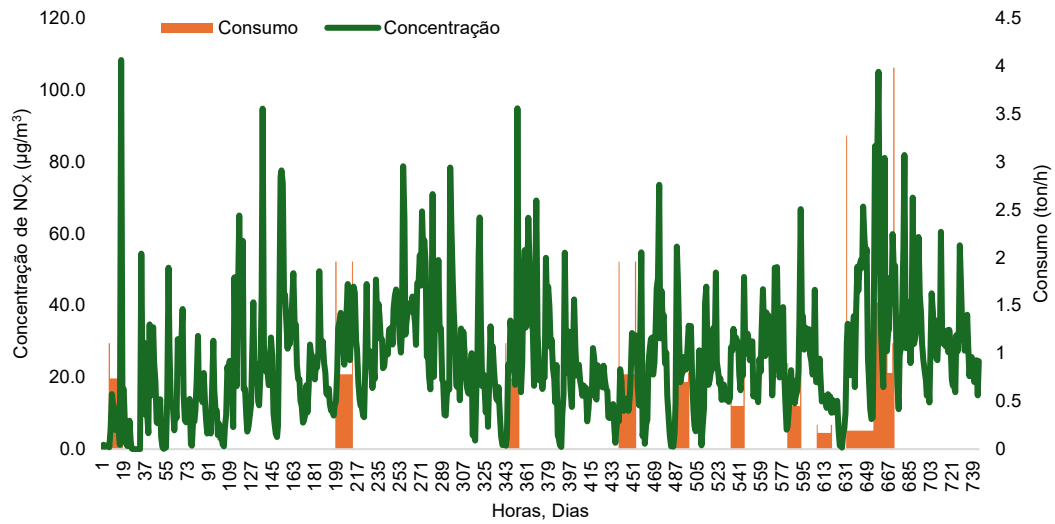


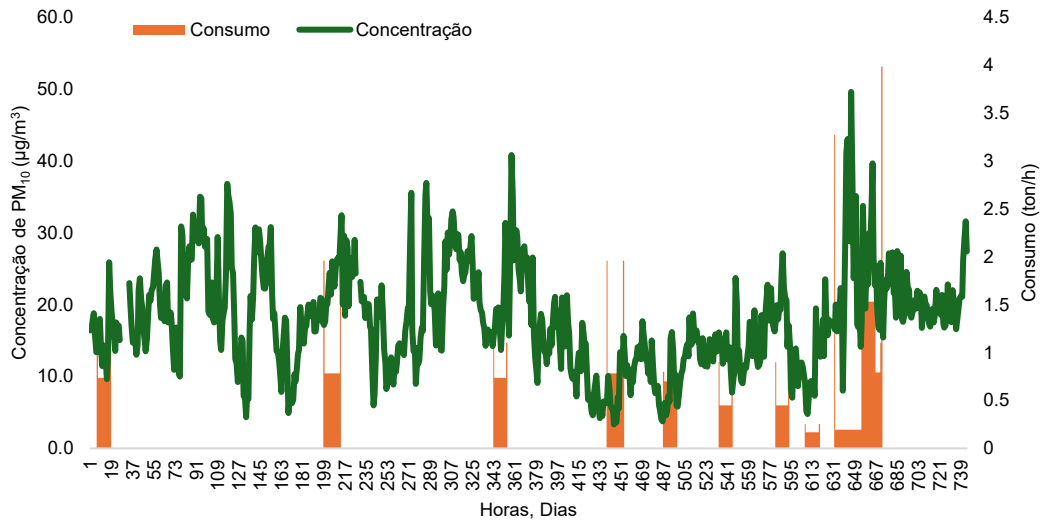
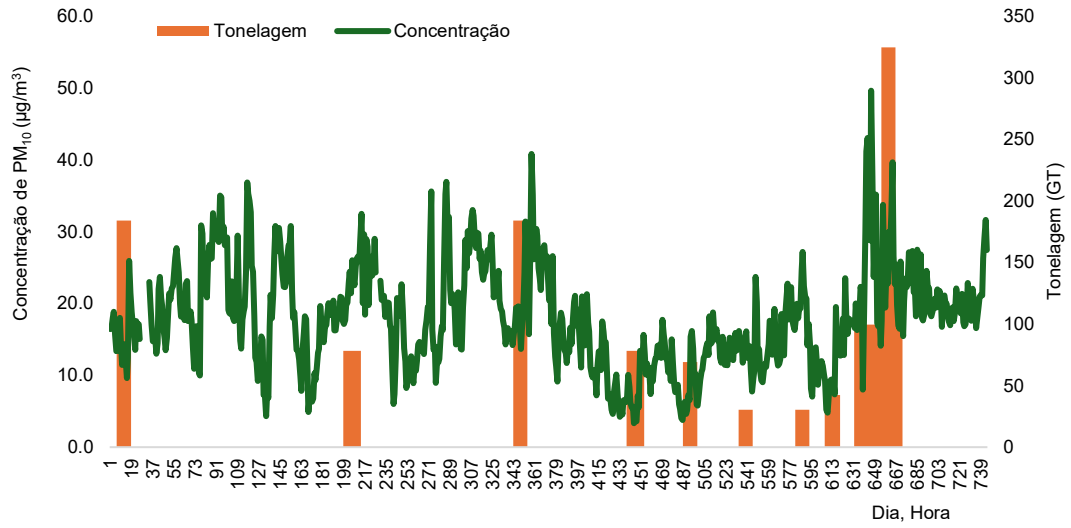


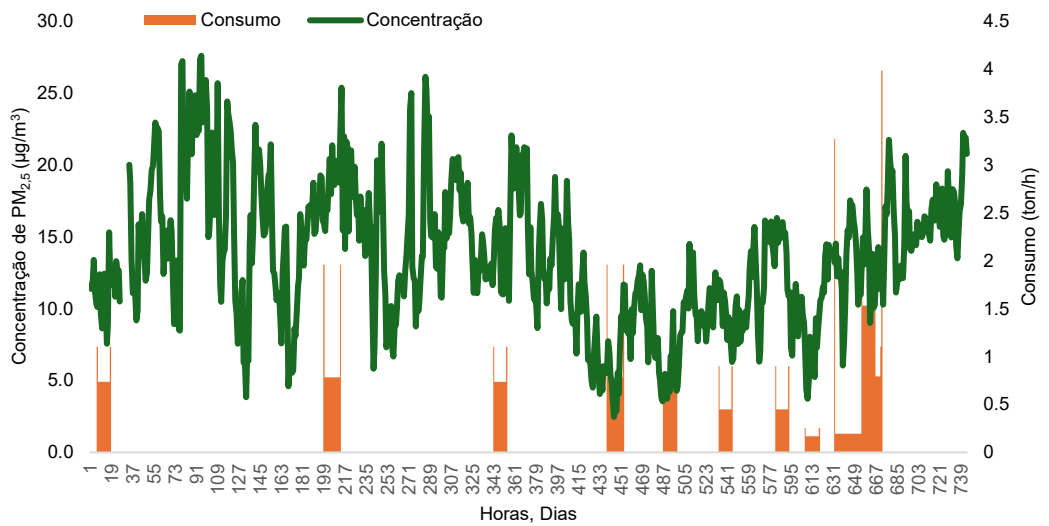
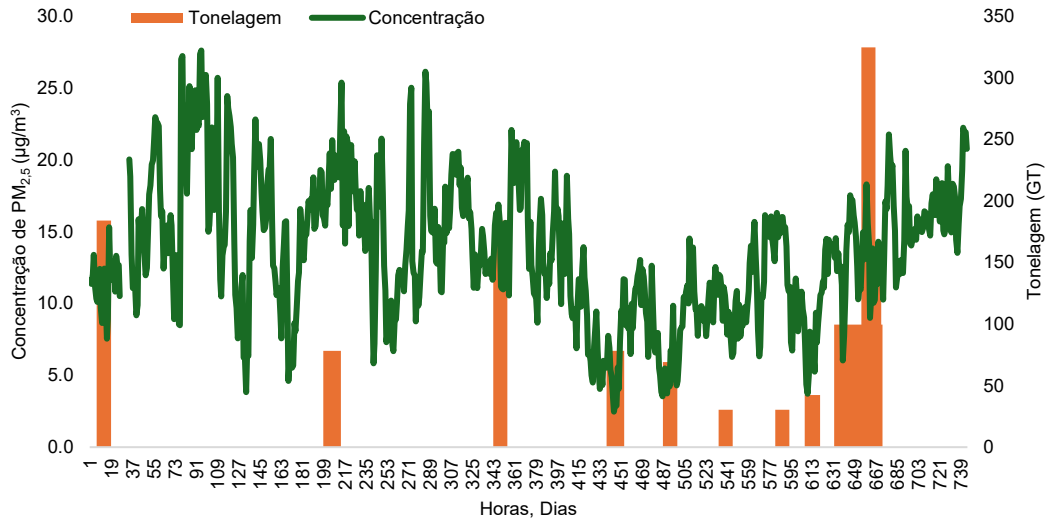


Anexo VIII – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de março segundo o consumo e a tonelage dos navios na “P3-Móvel”

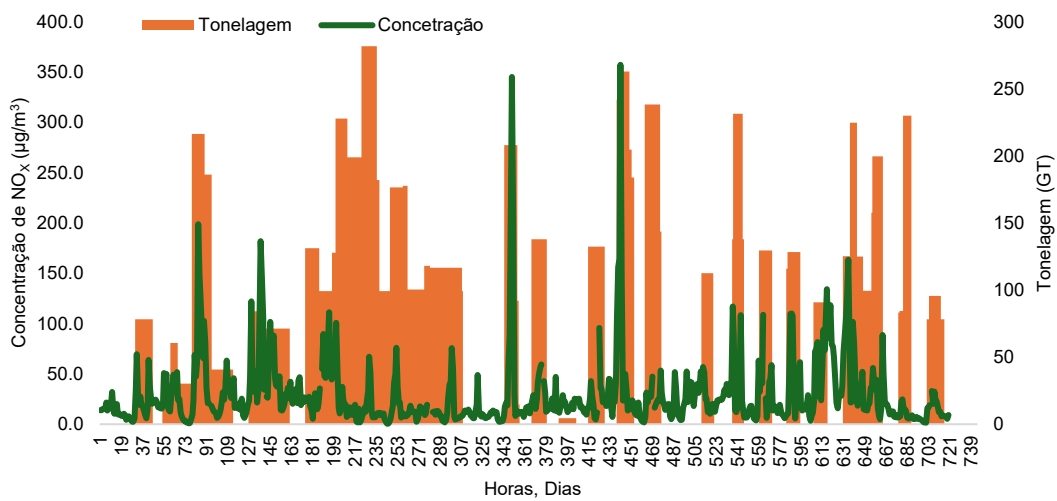
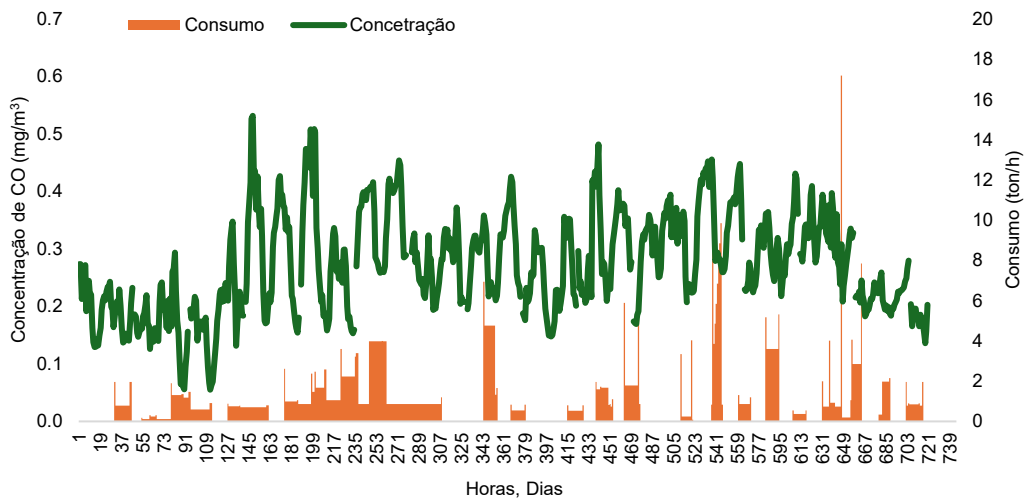
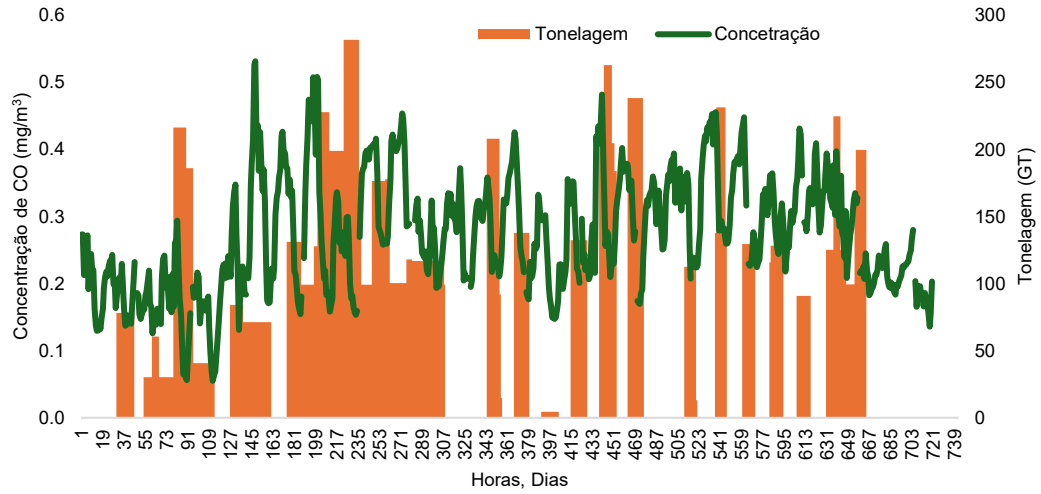


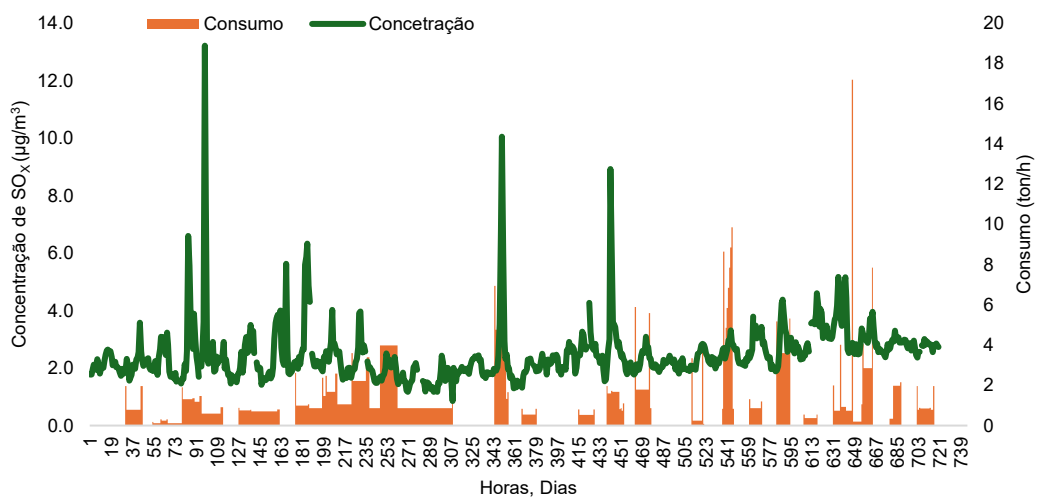
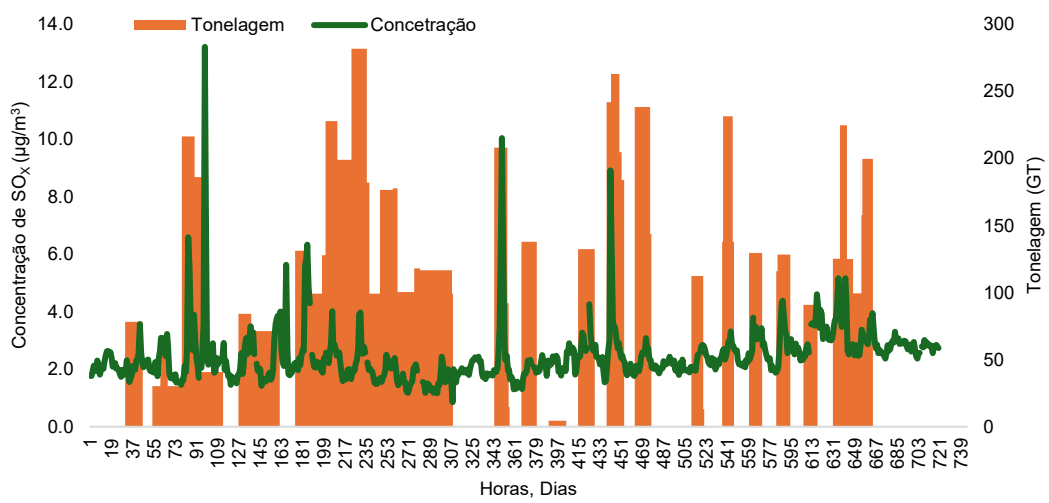
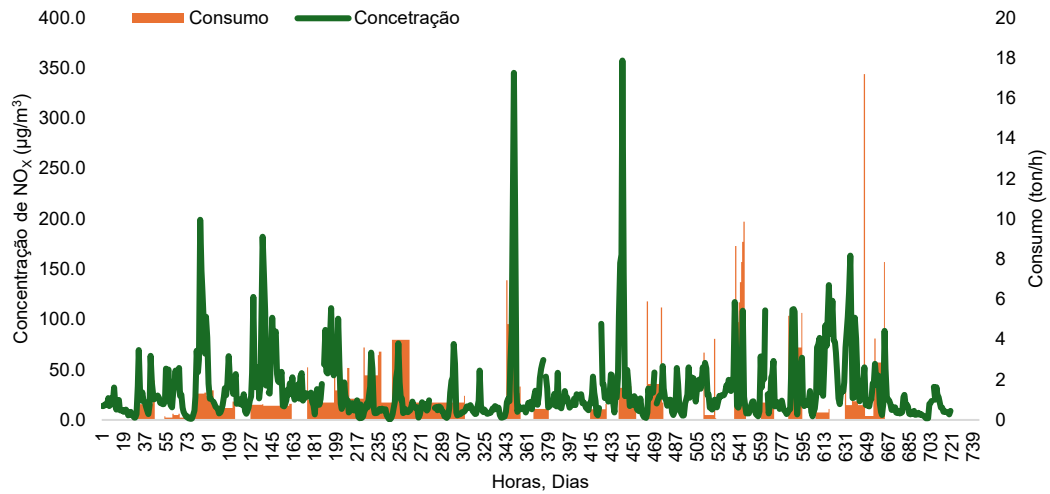


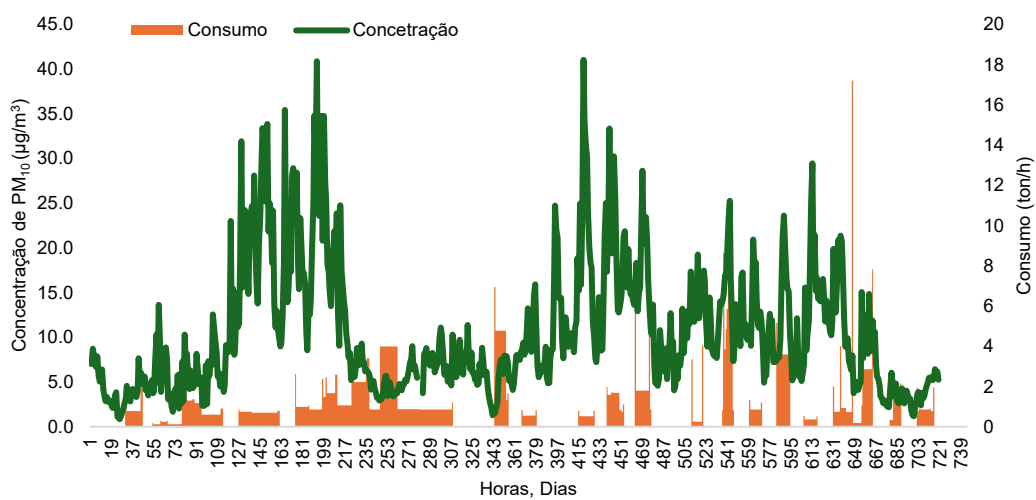
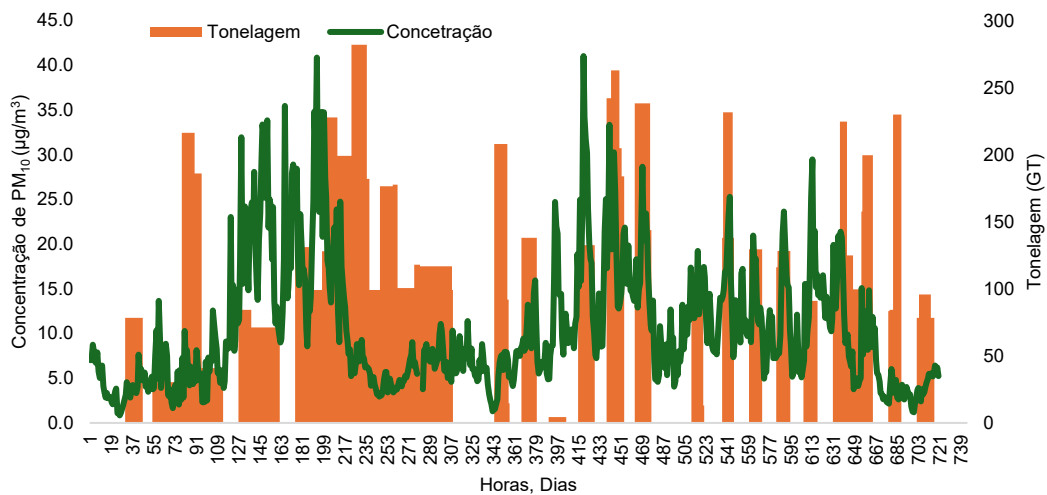


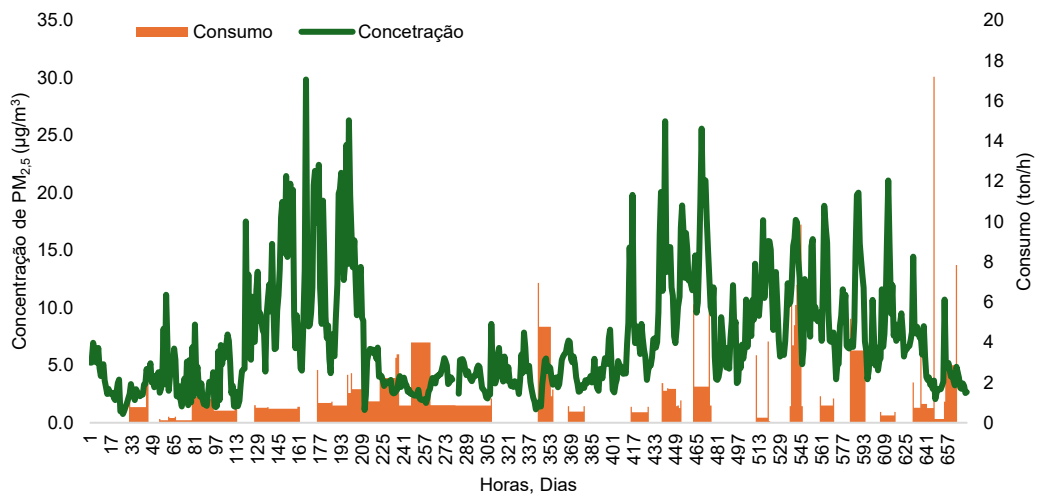
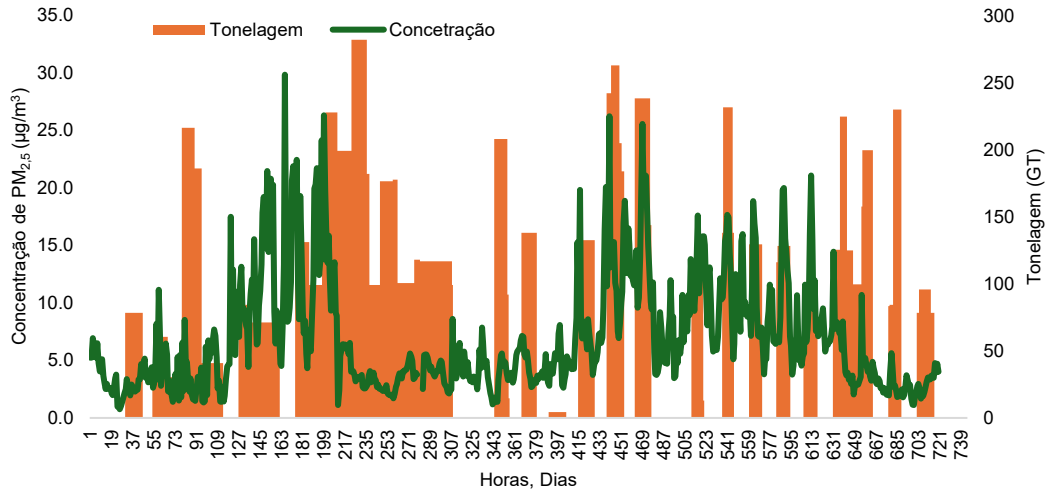


Anexo IX – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês abril segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “Estação-Física”

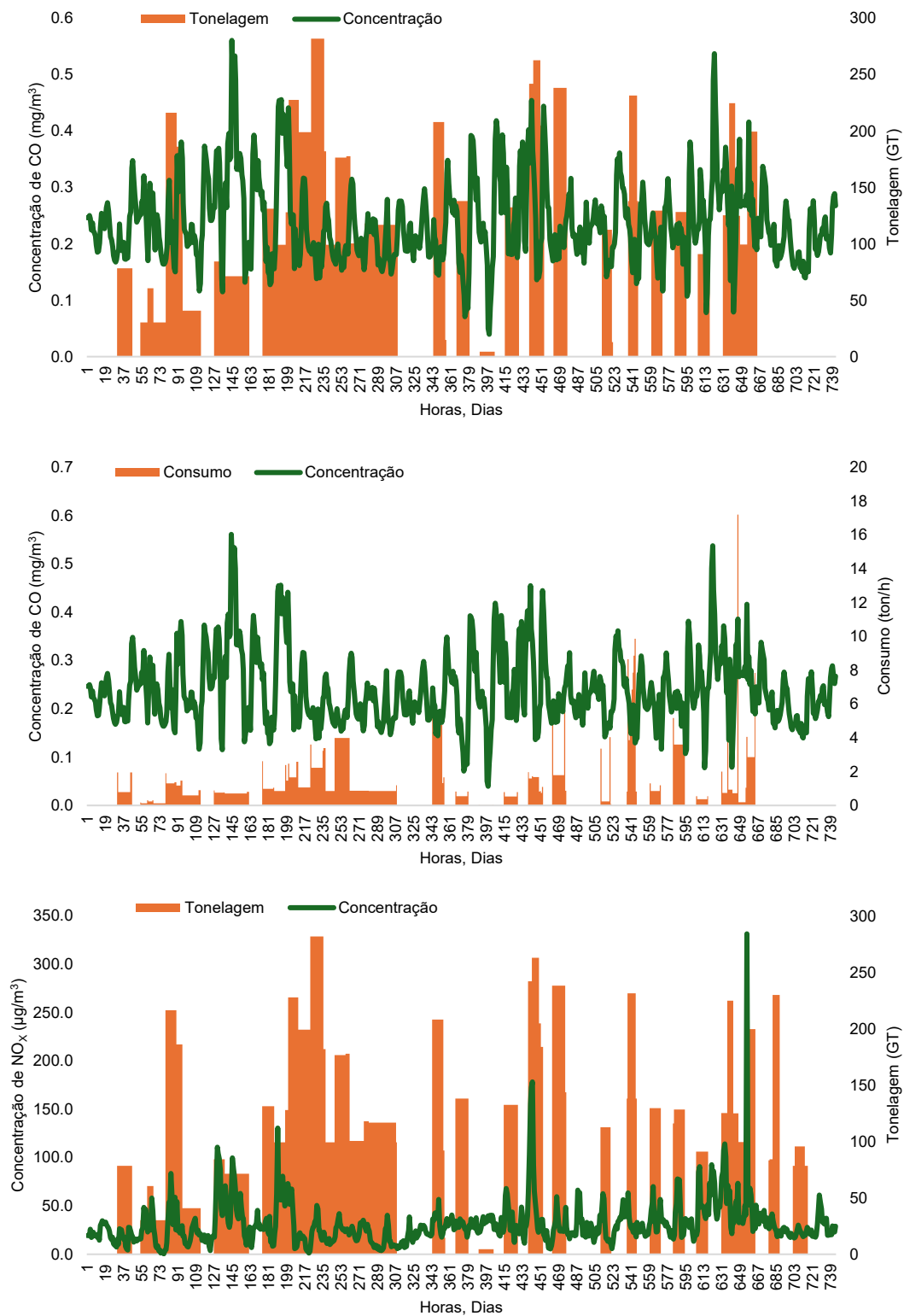


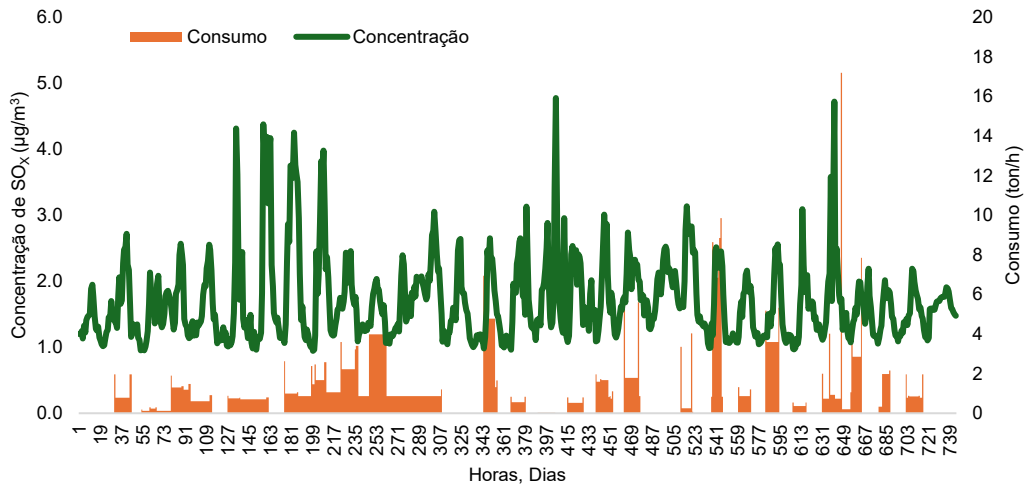
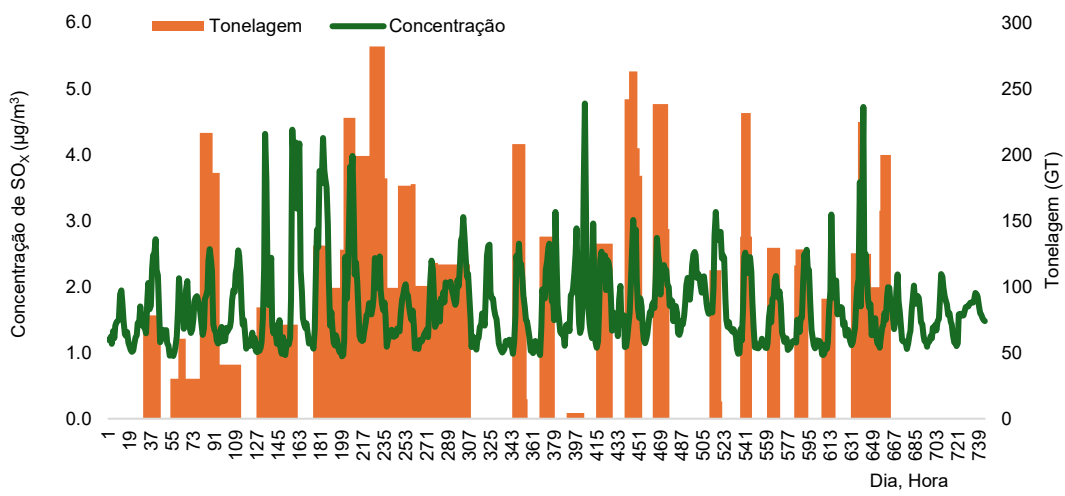
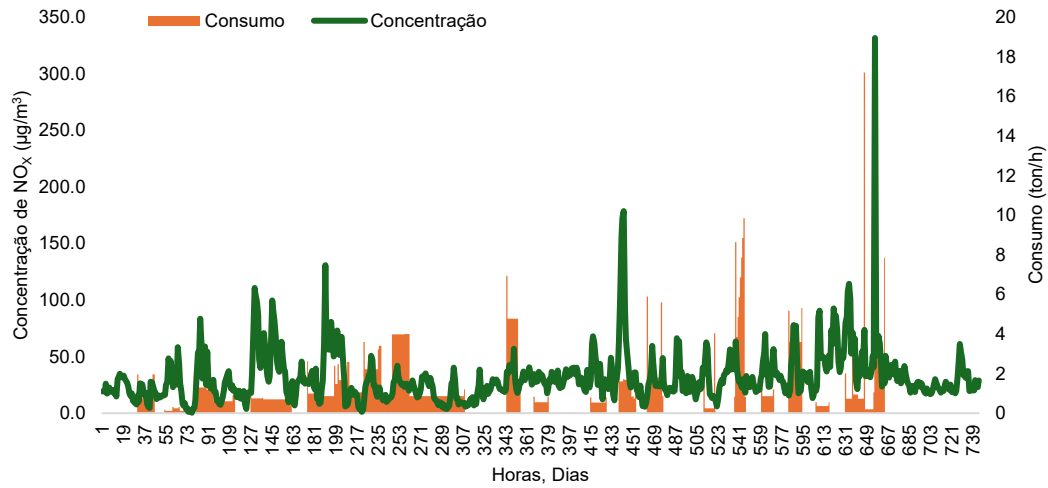


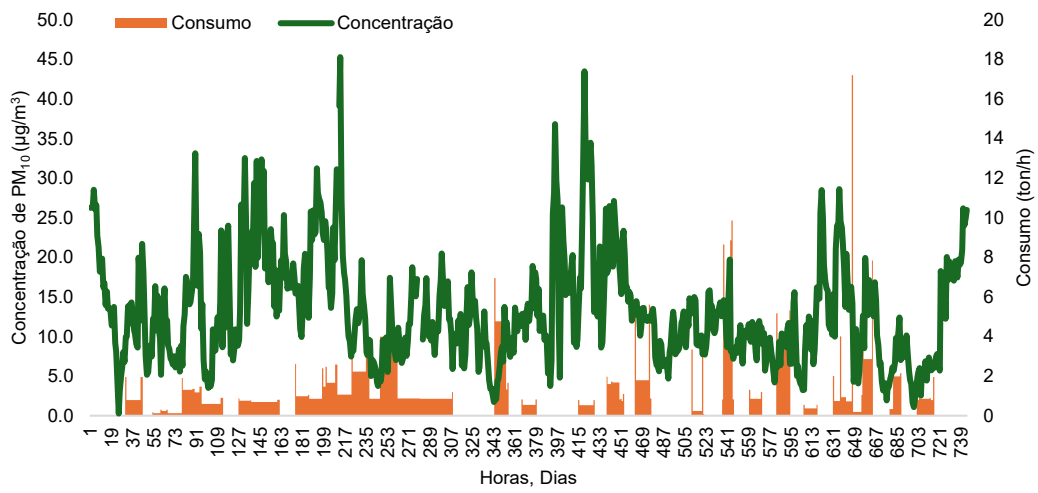
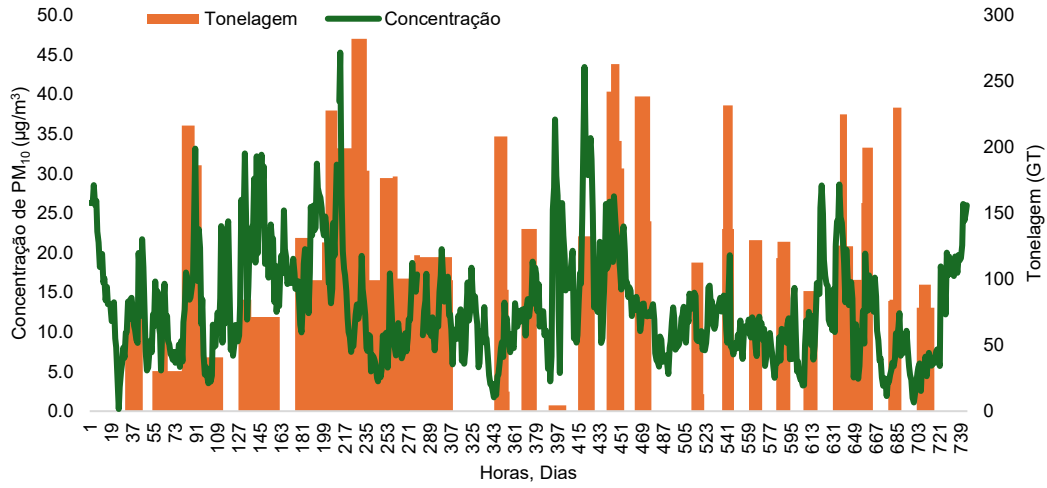


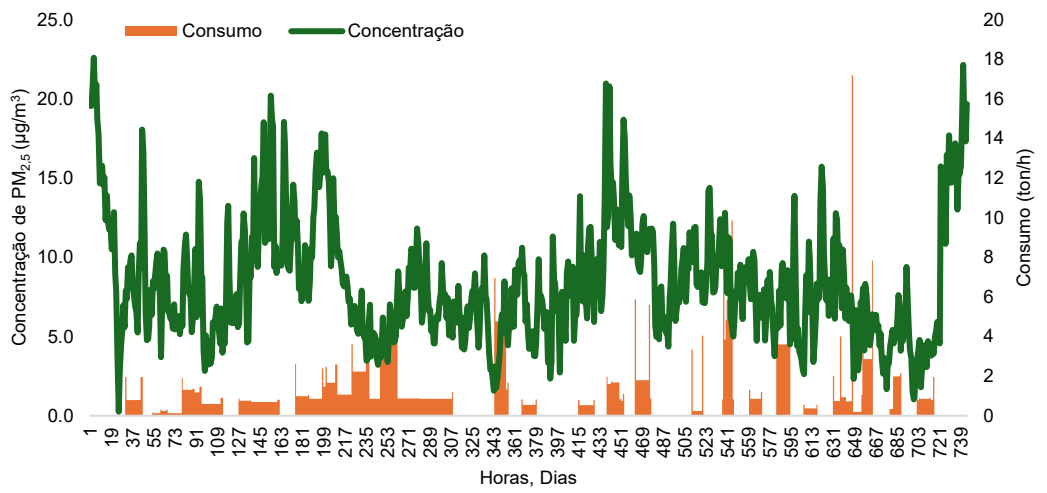
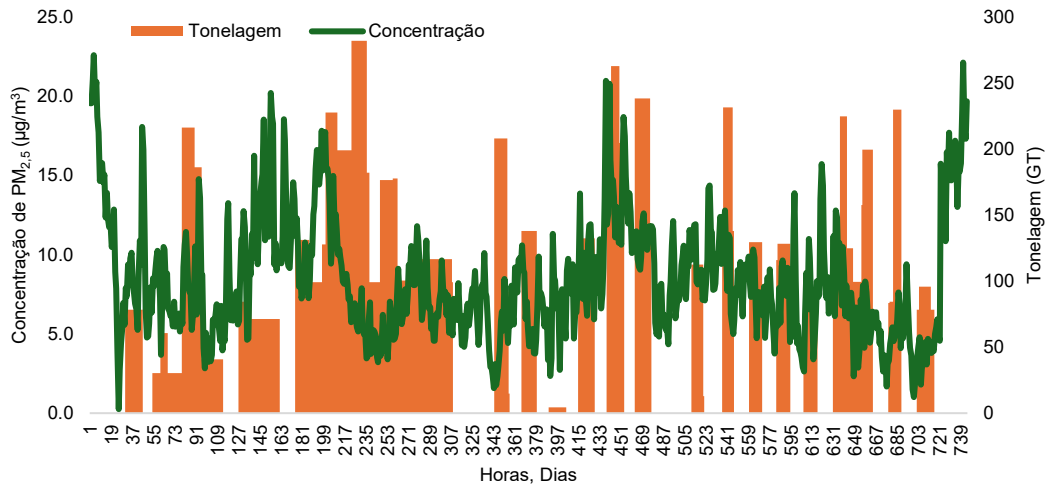


Anexo X – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de abril segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P1-Móvel”

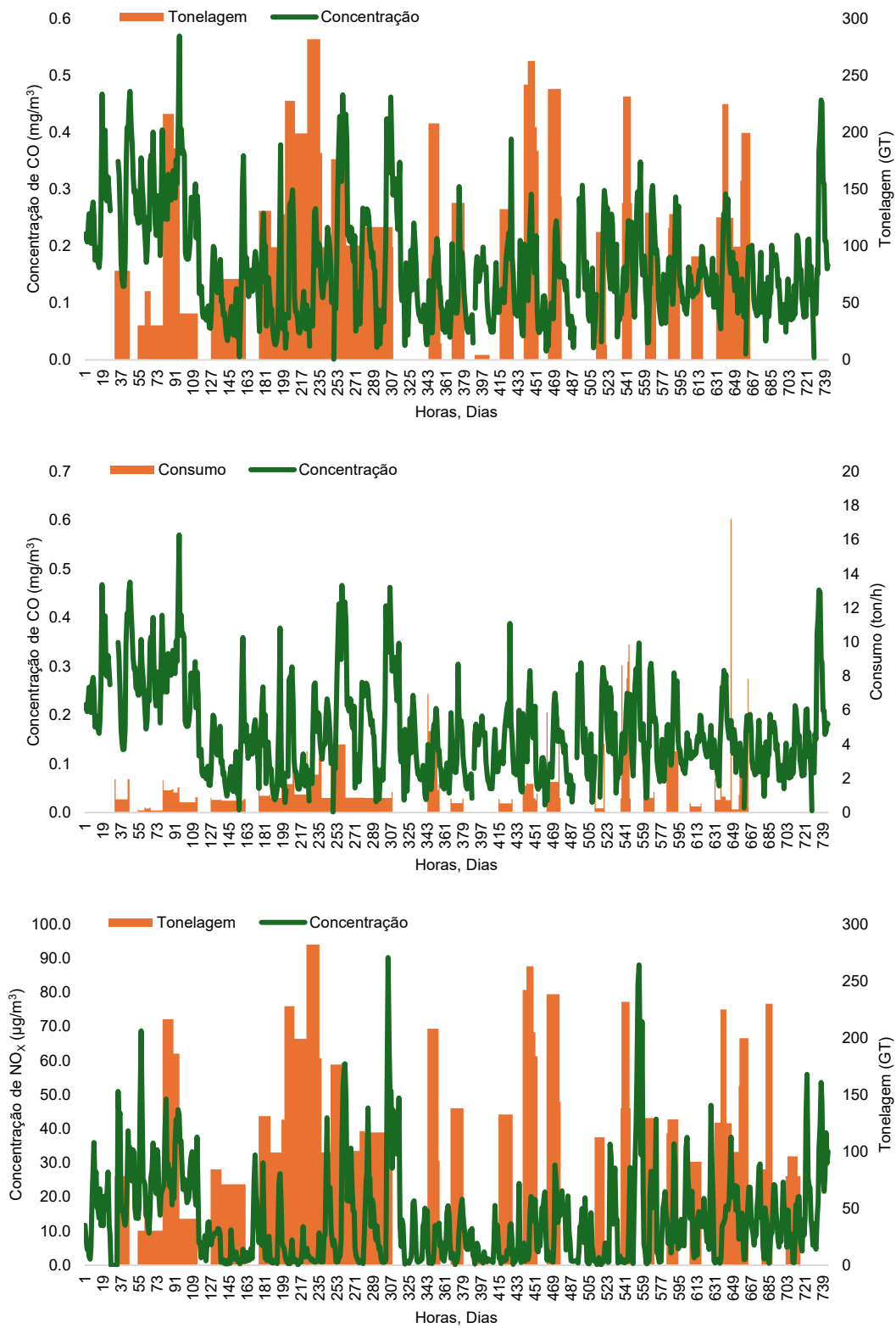


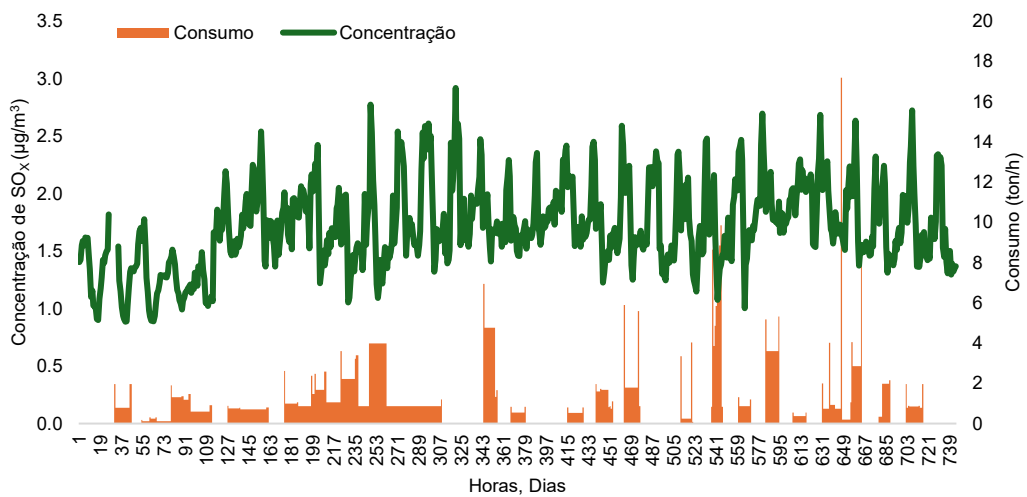
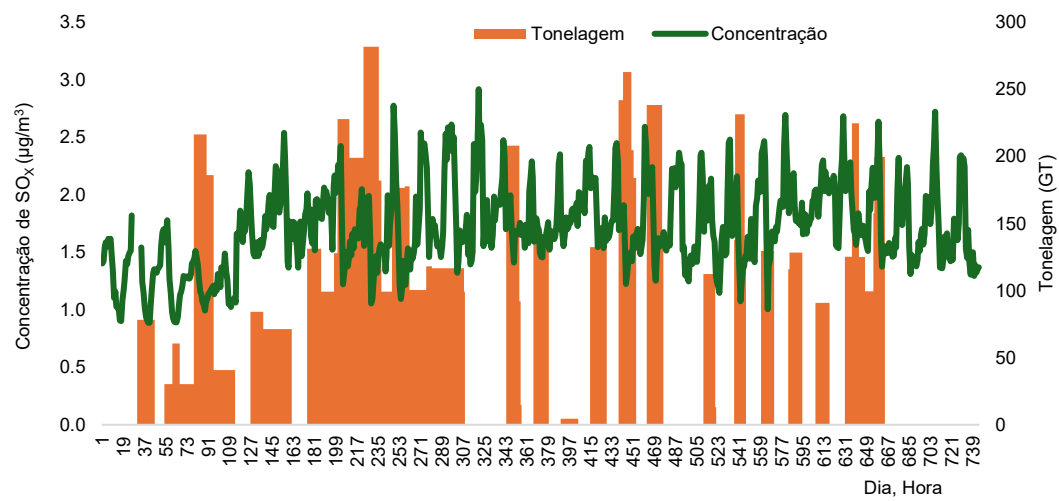
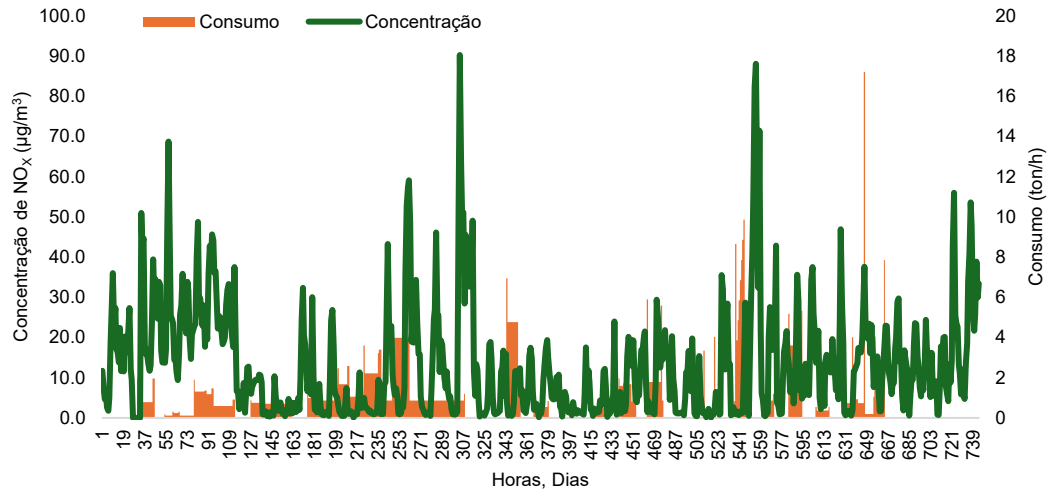


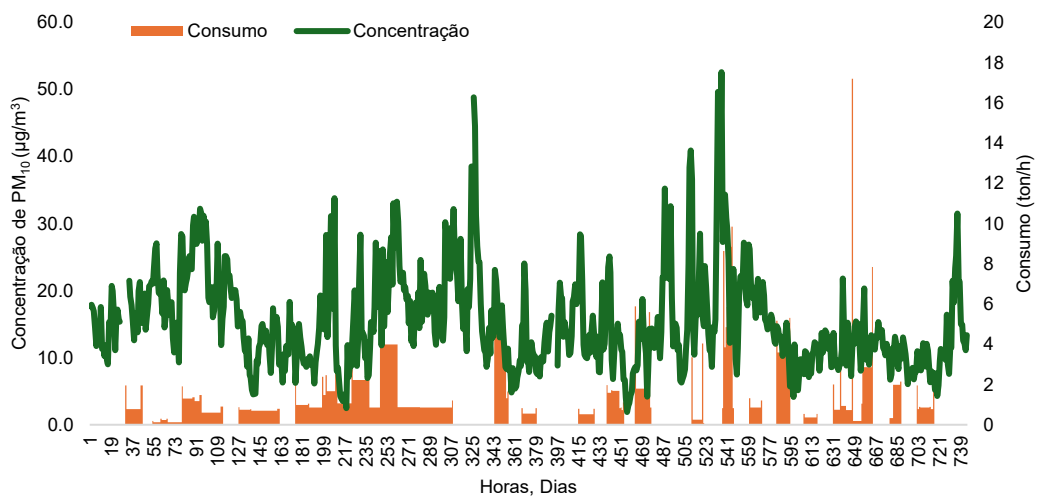
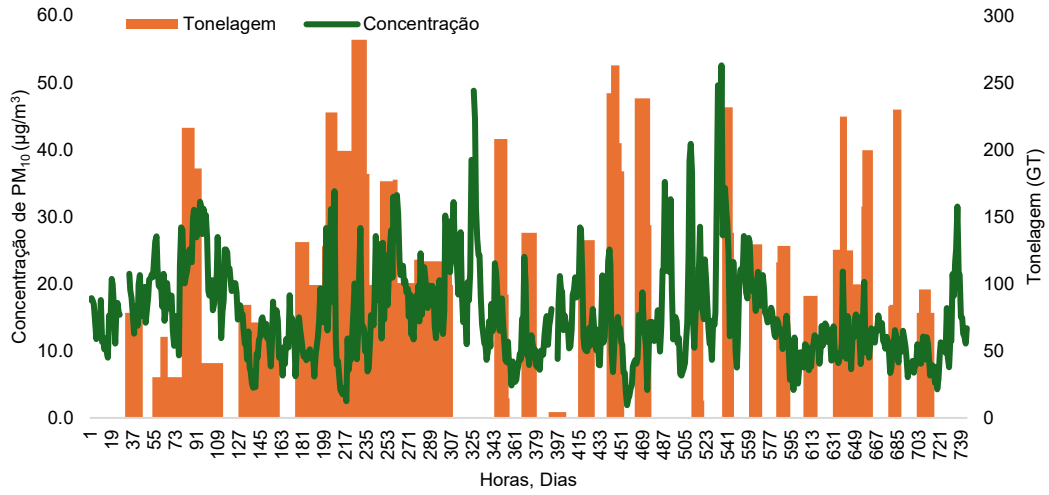


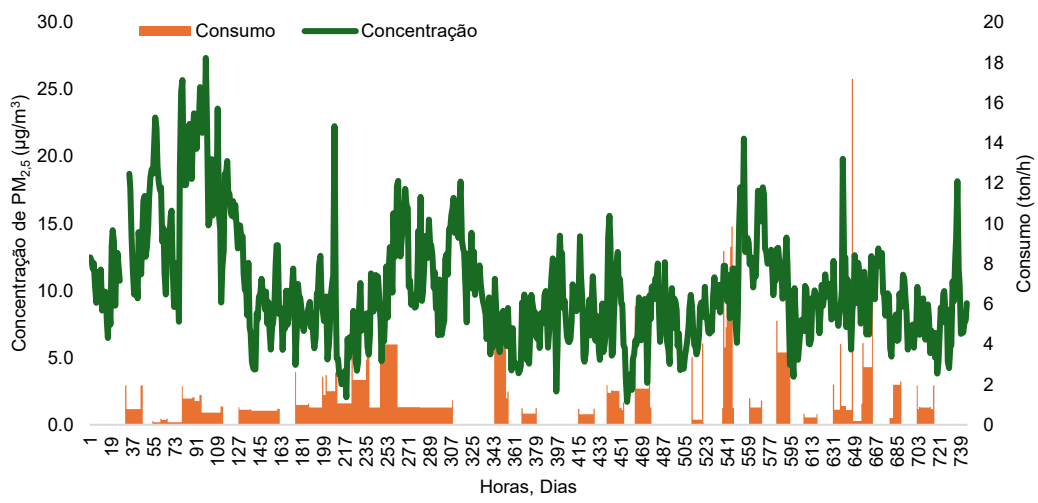
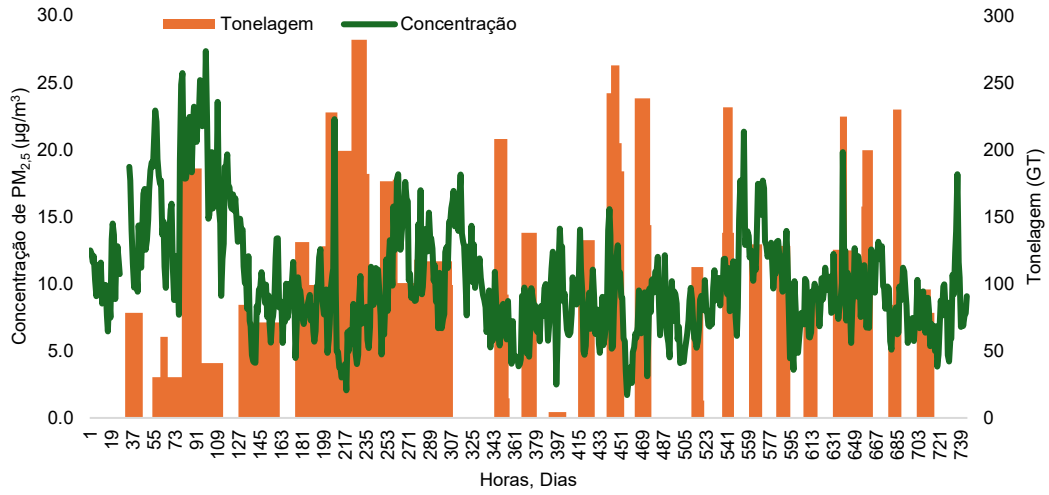


Anexo XI – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de abril segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P2-Móvel”

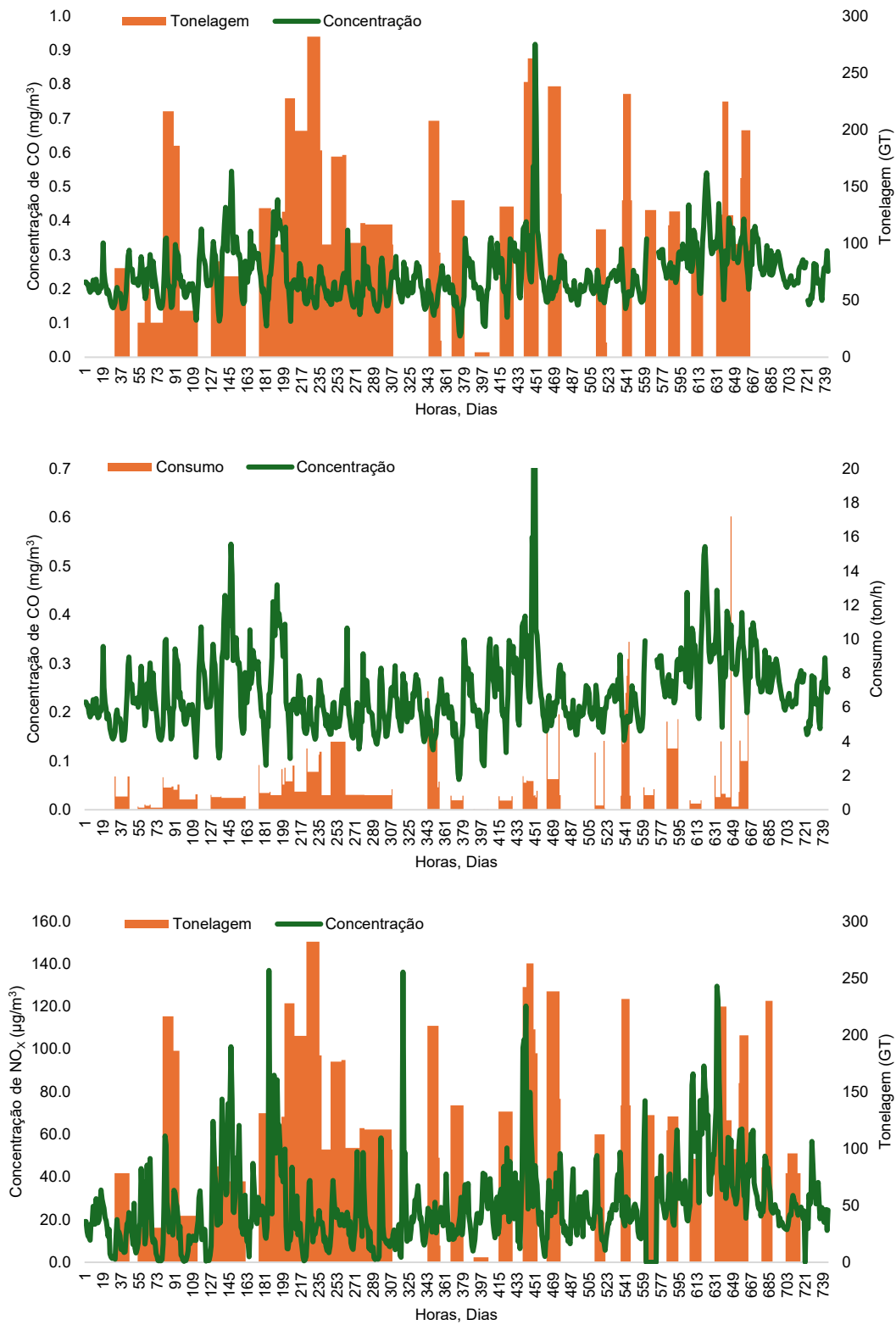


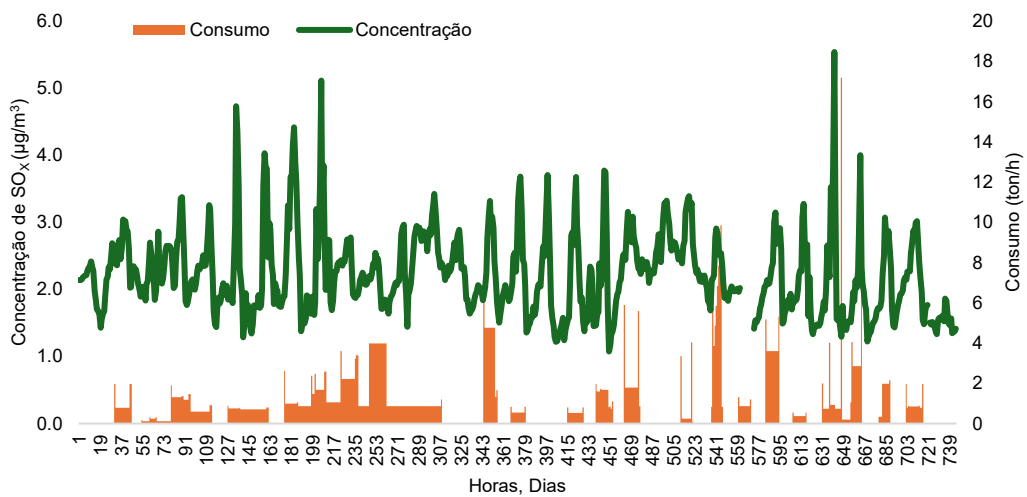
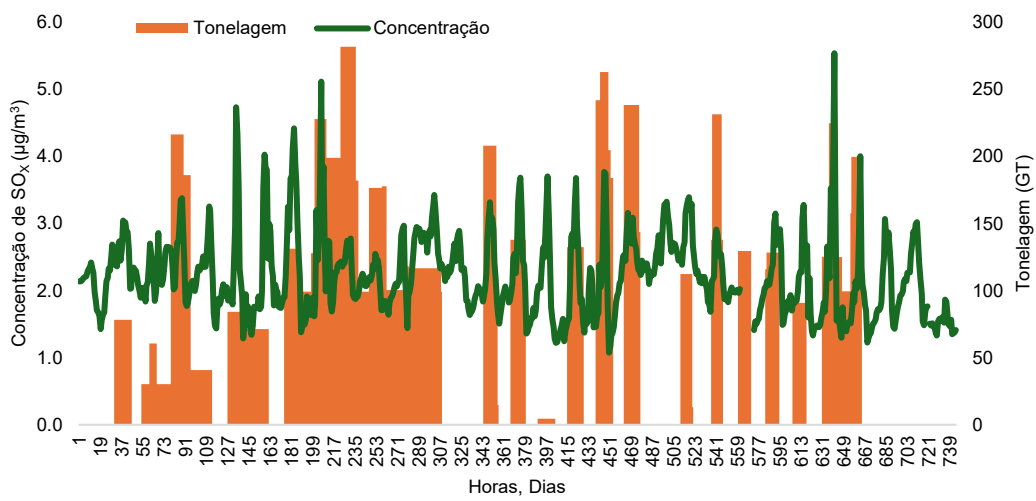
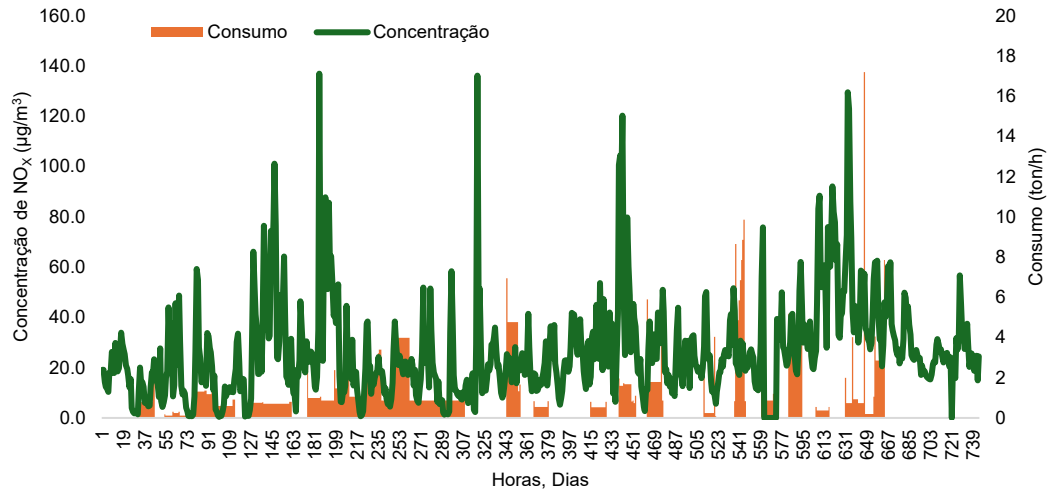


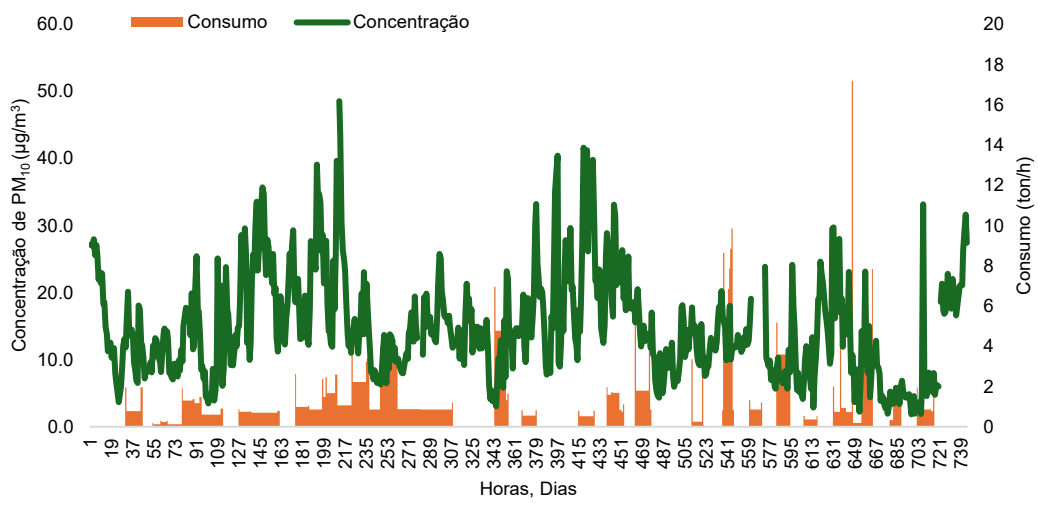
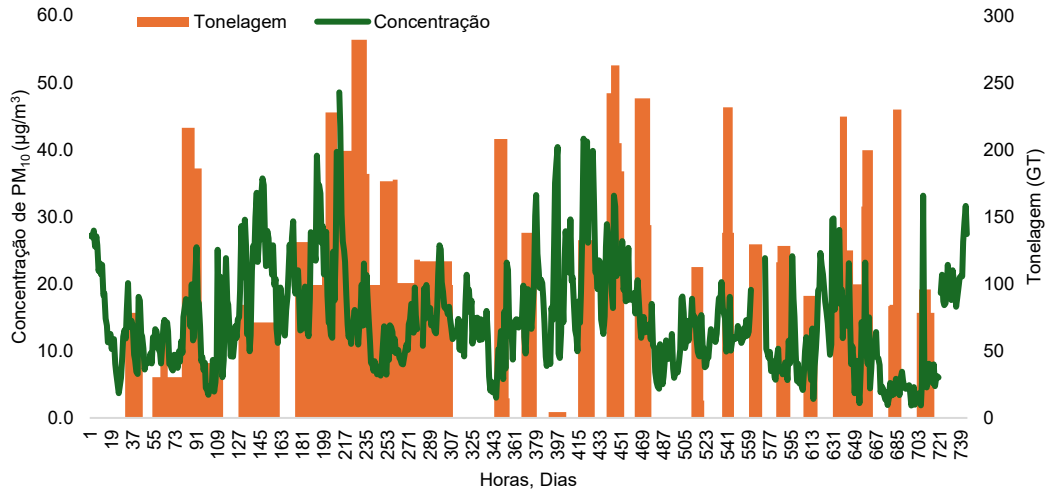


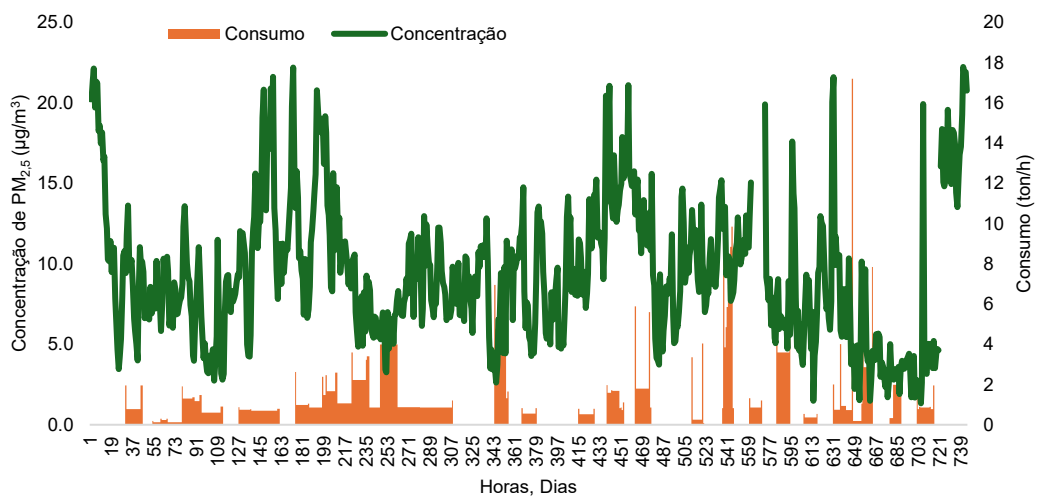
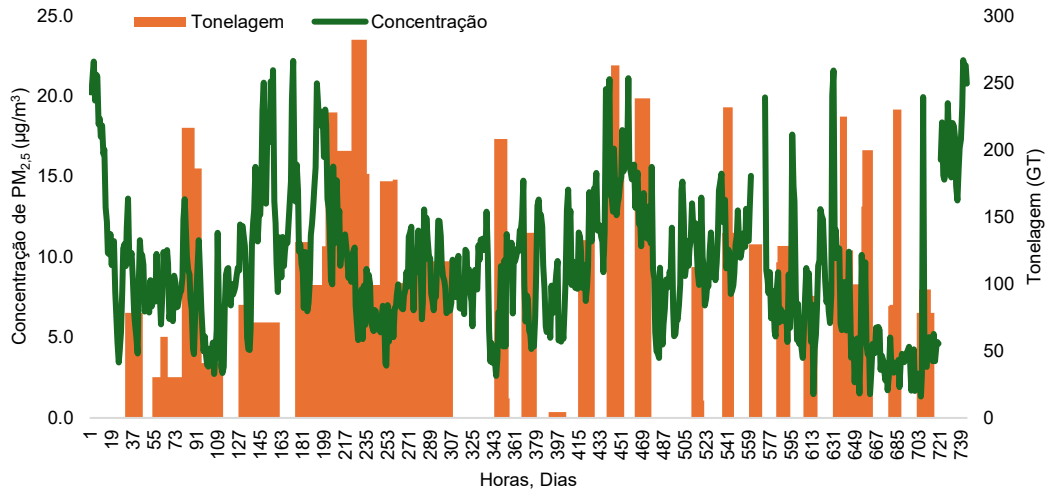


Anexo XII – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de abril segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P3-Móvel”

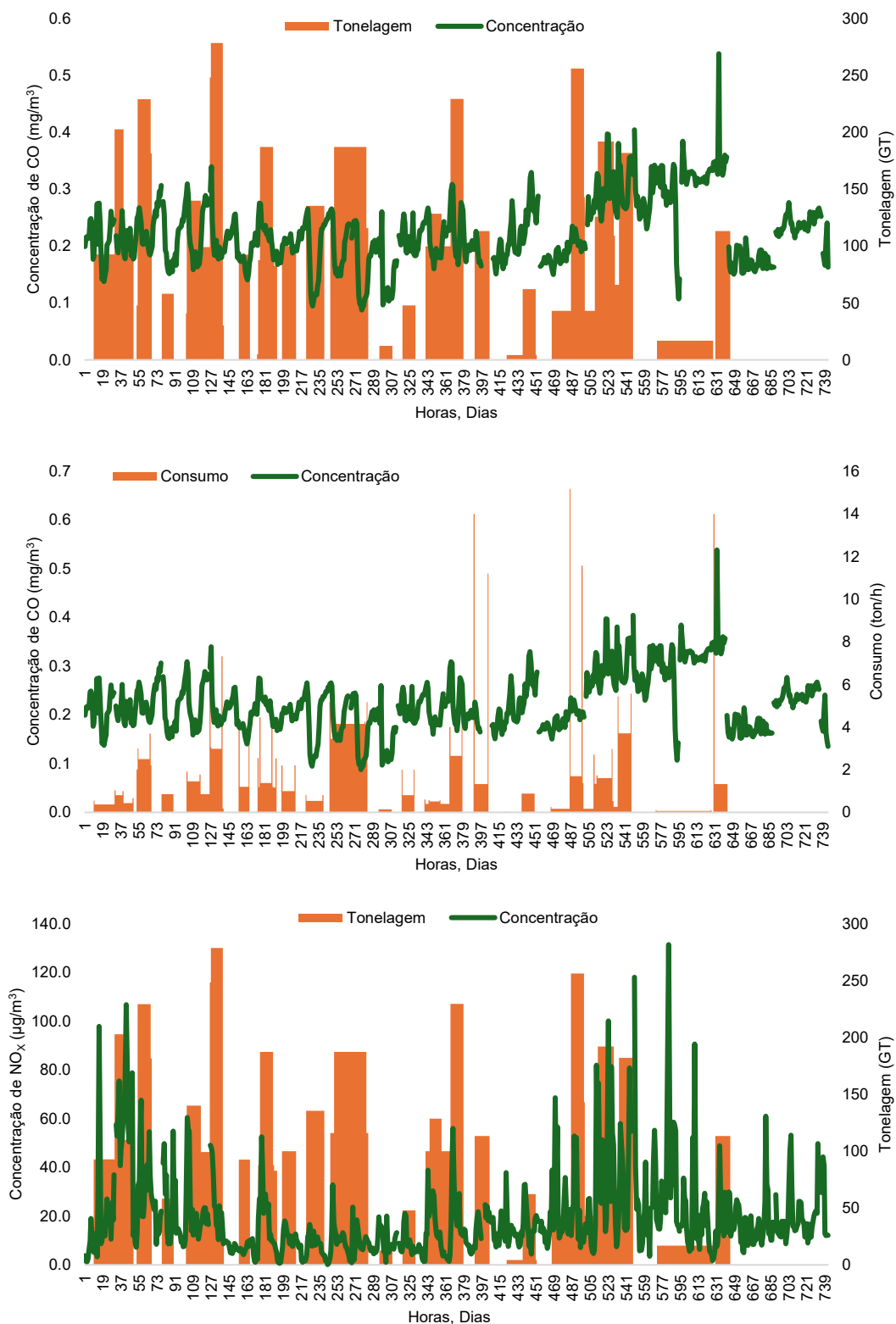


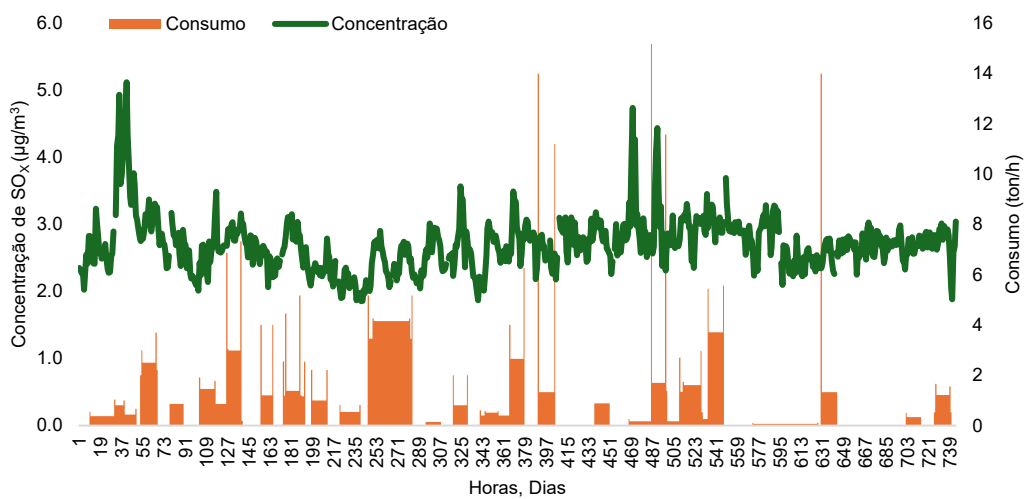
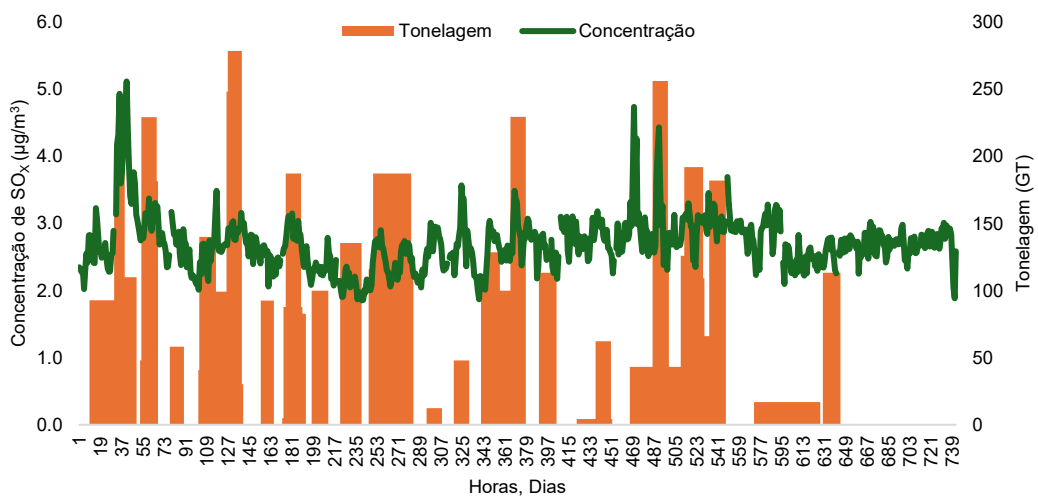
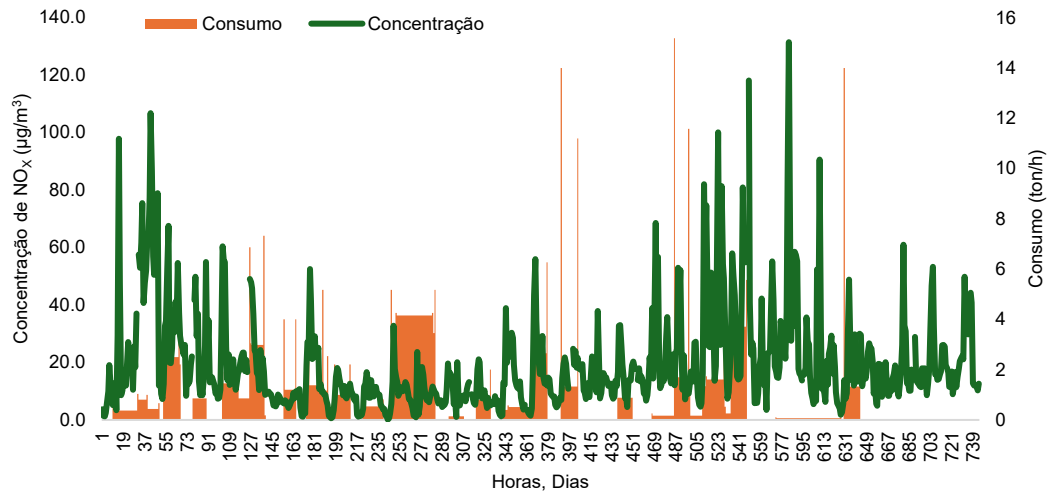


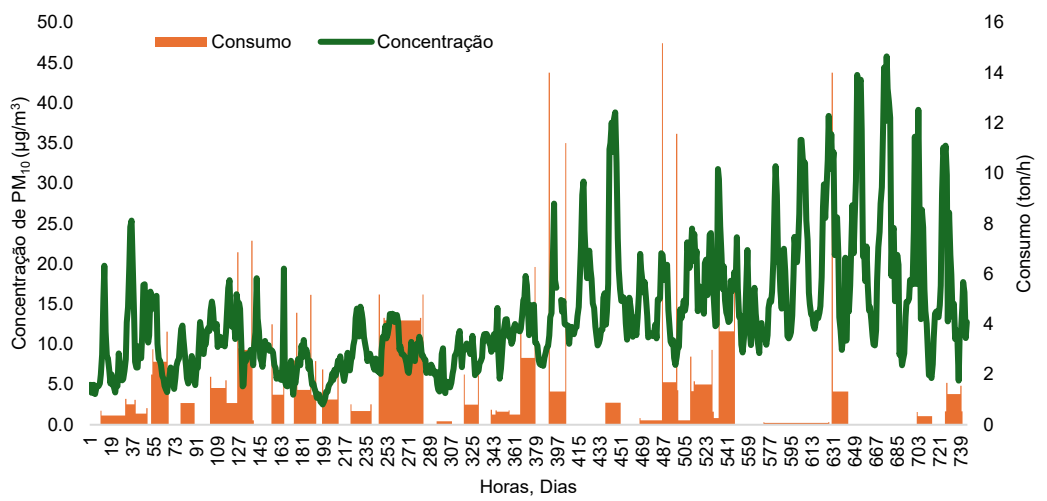
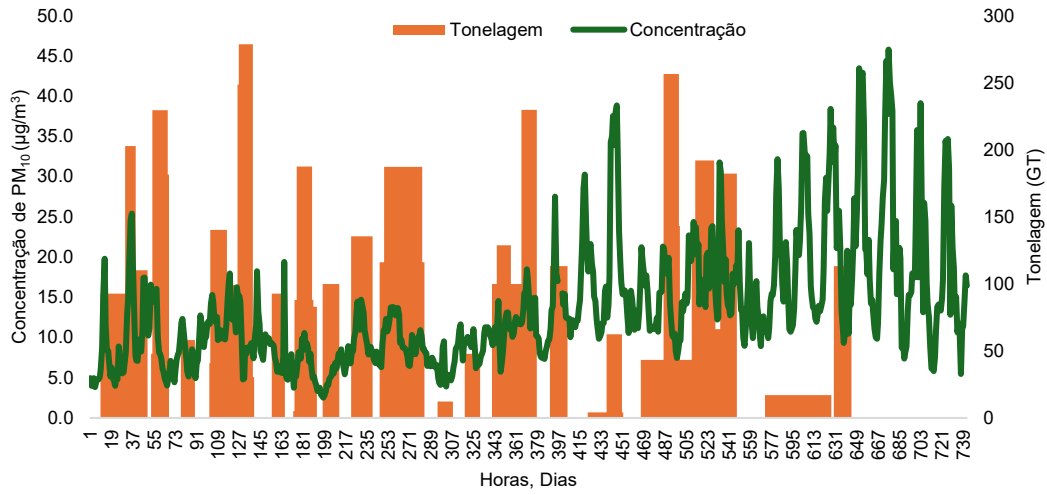


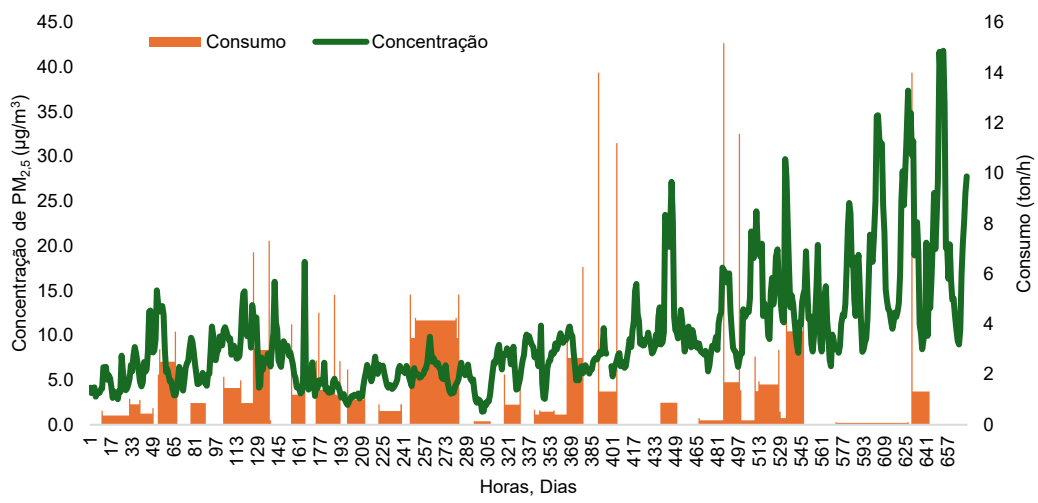
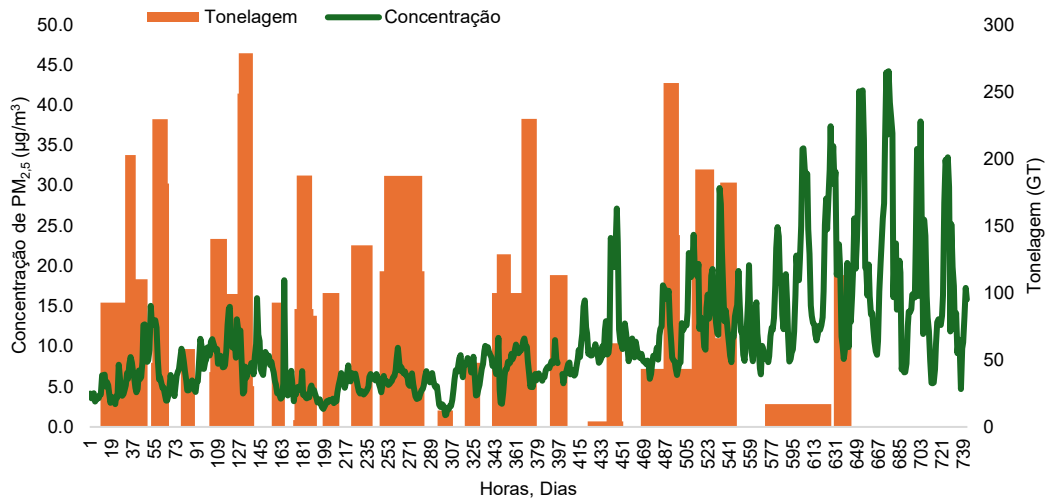


Anexo XIII – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de maio segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “Estação-Física”

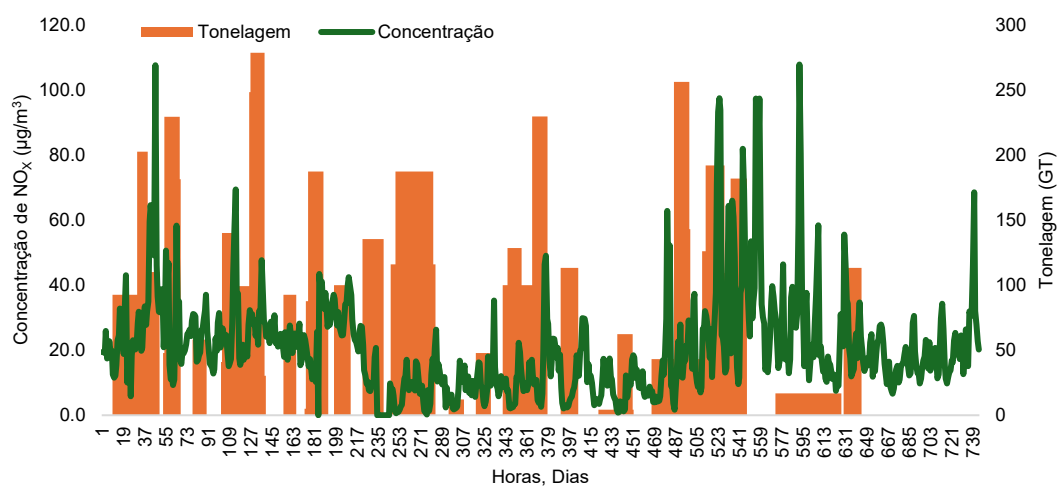
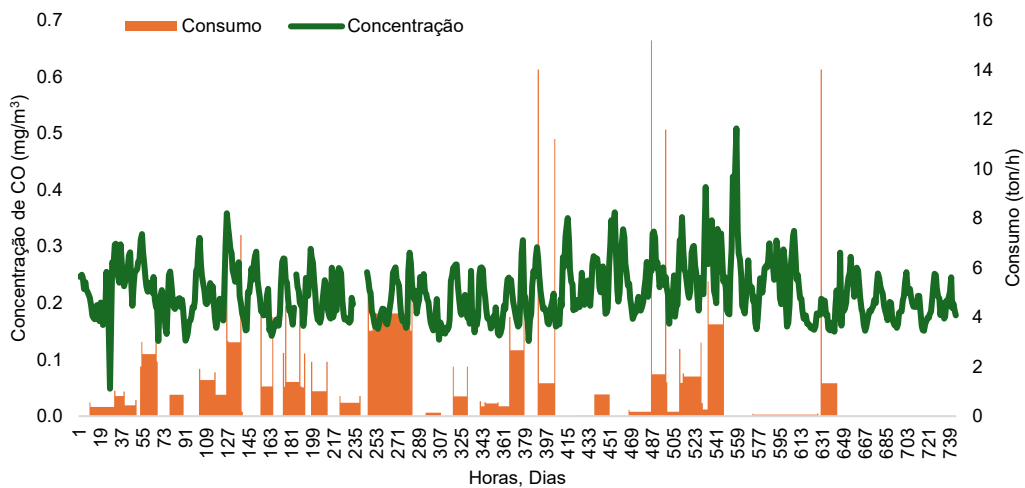
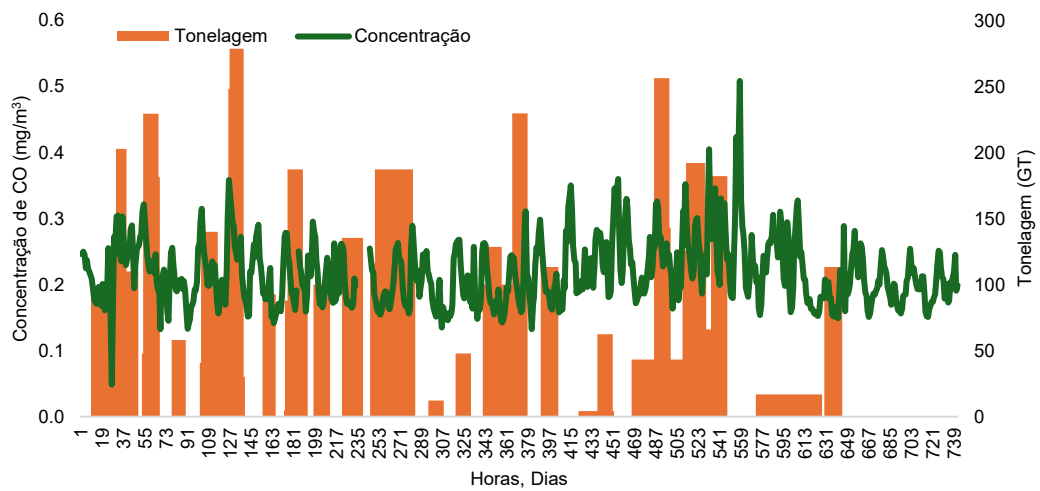


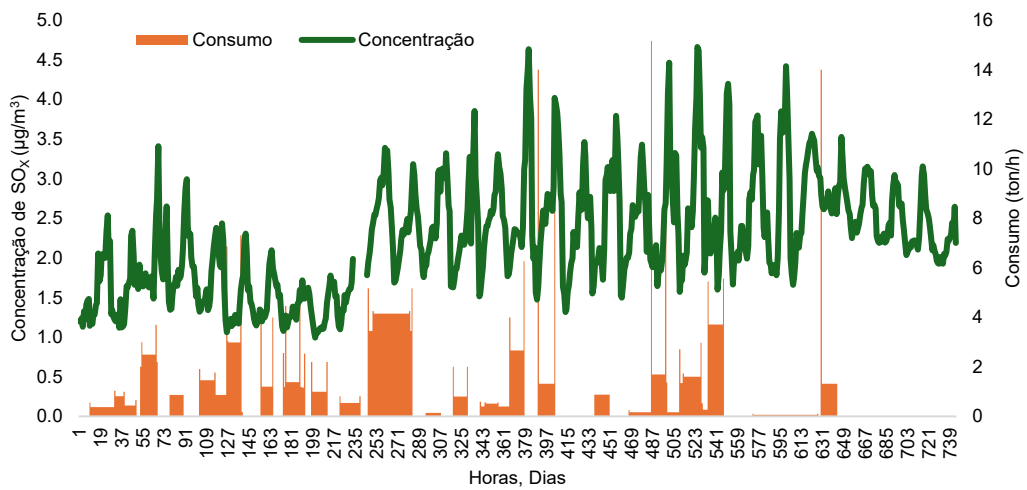
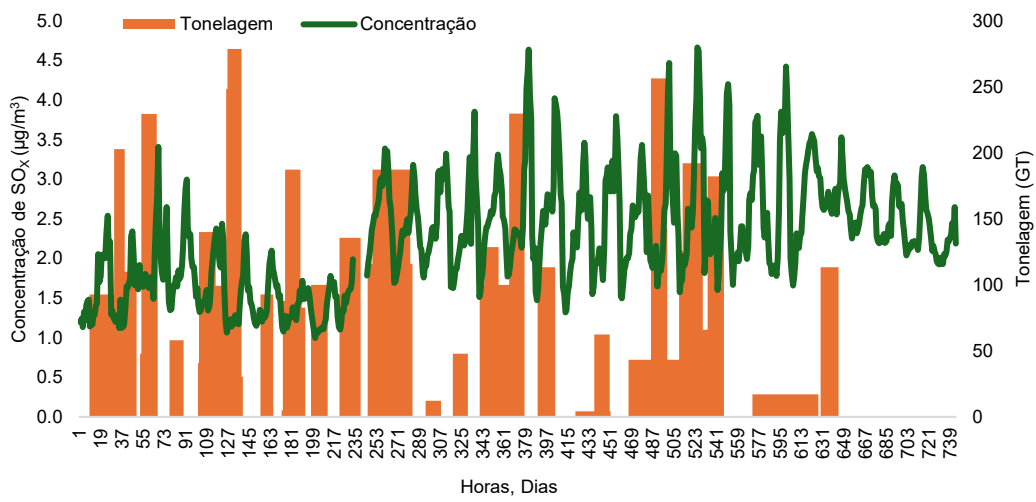
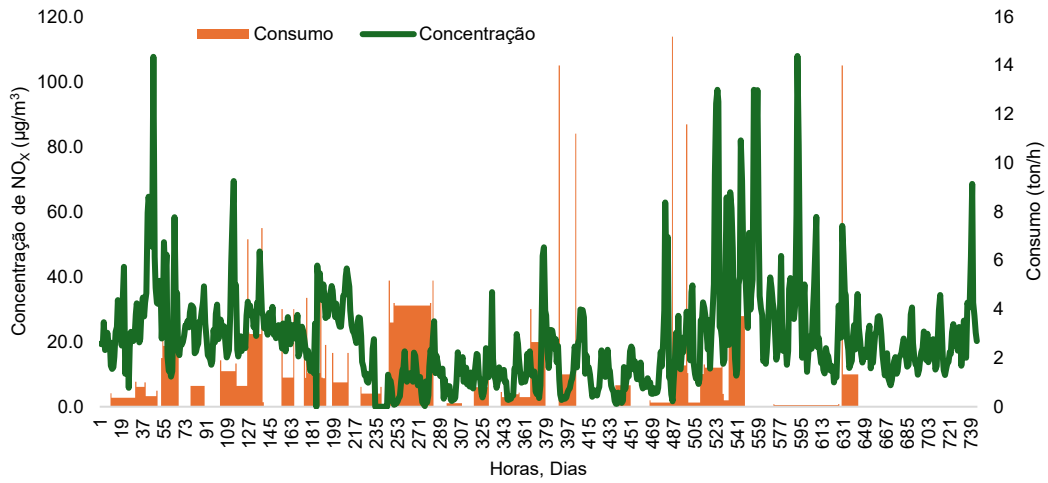


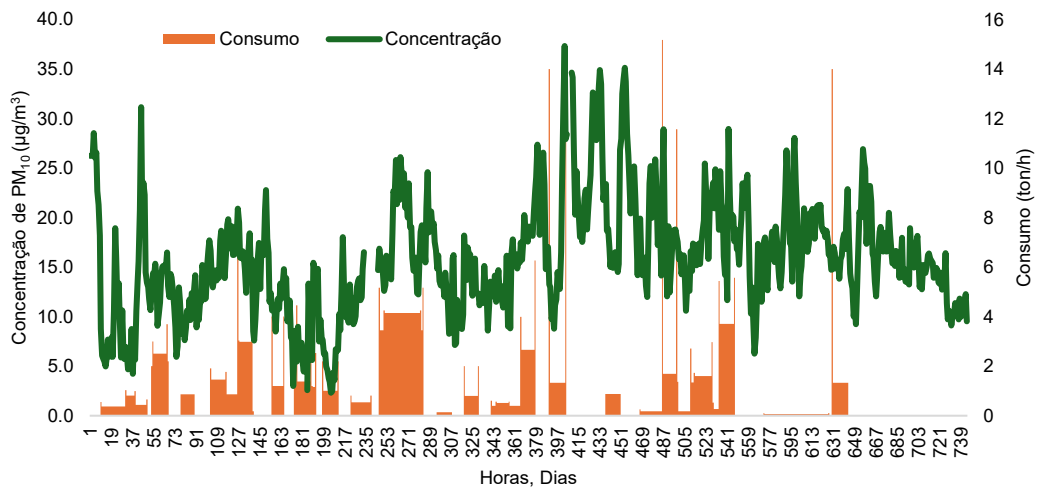
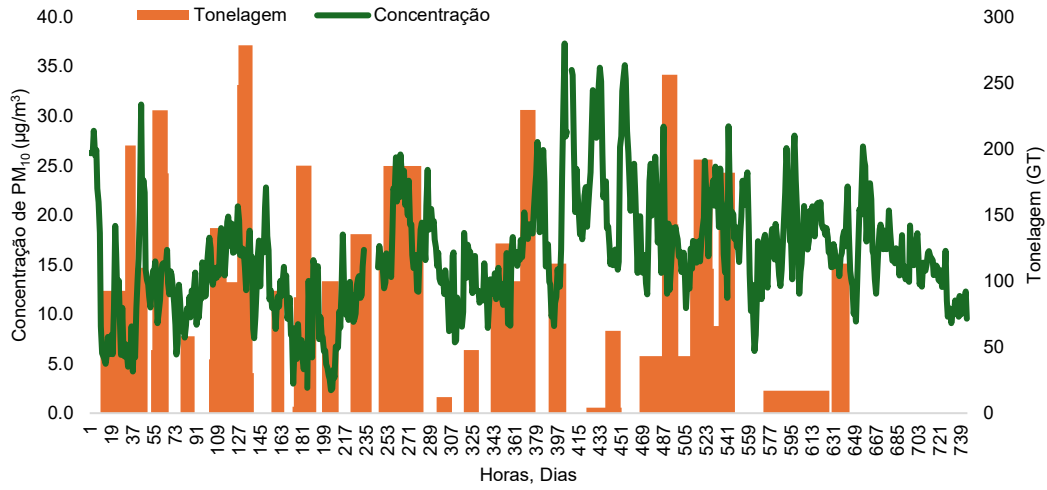


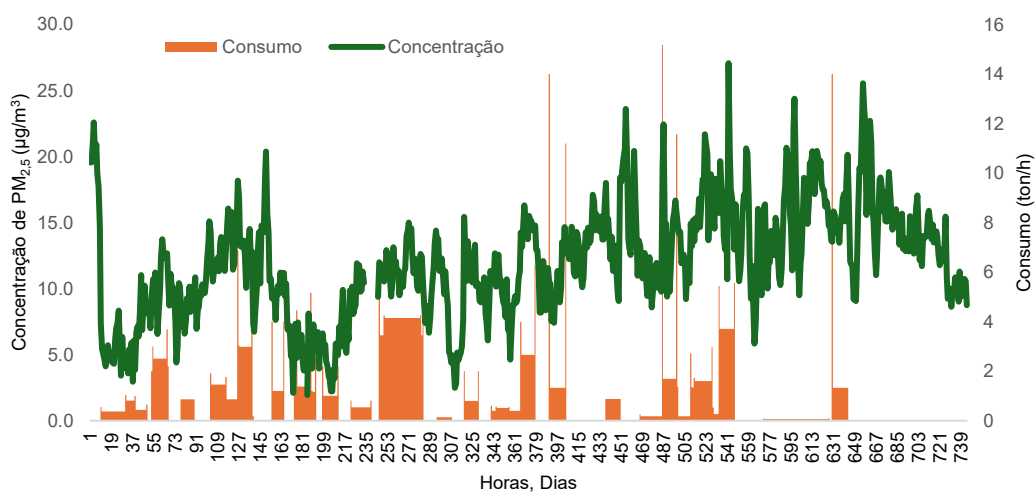
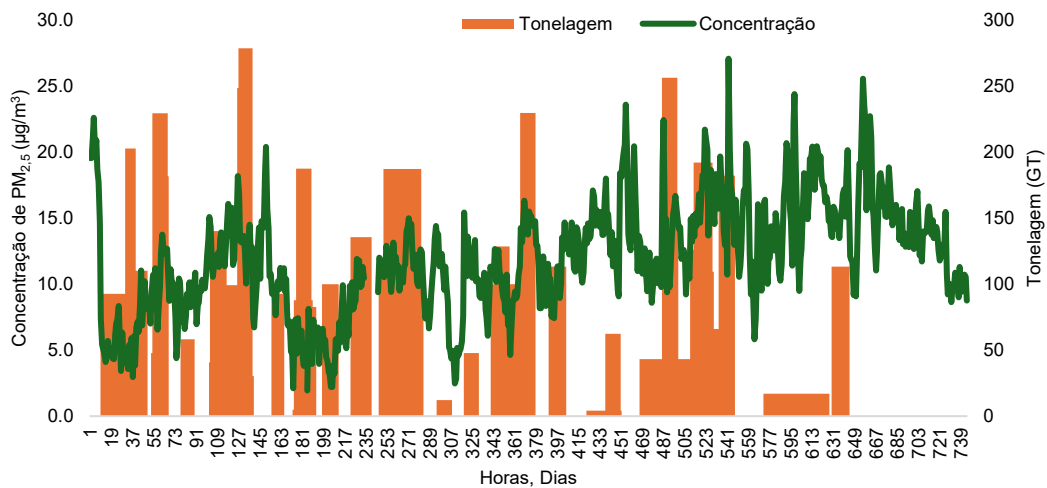


Anexo XIV – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de maio segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P1-Móvel”

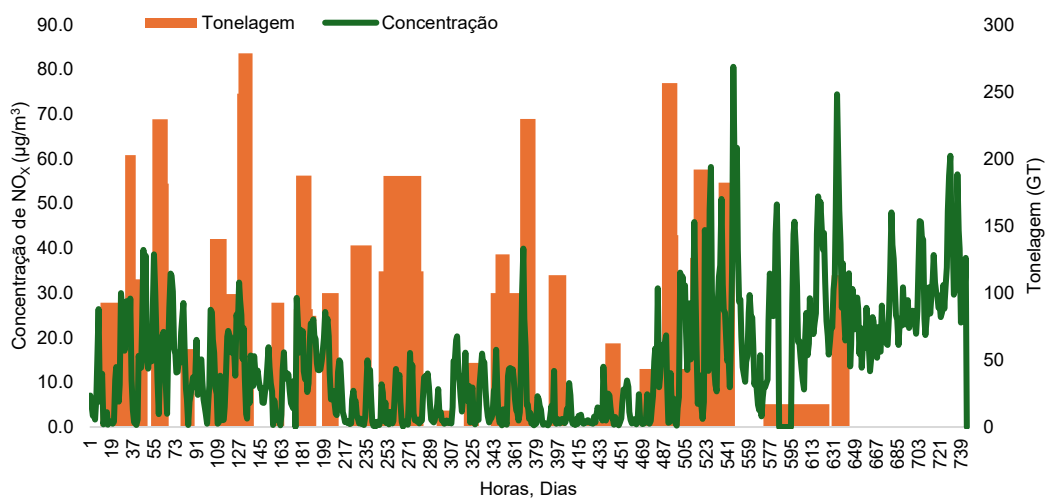
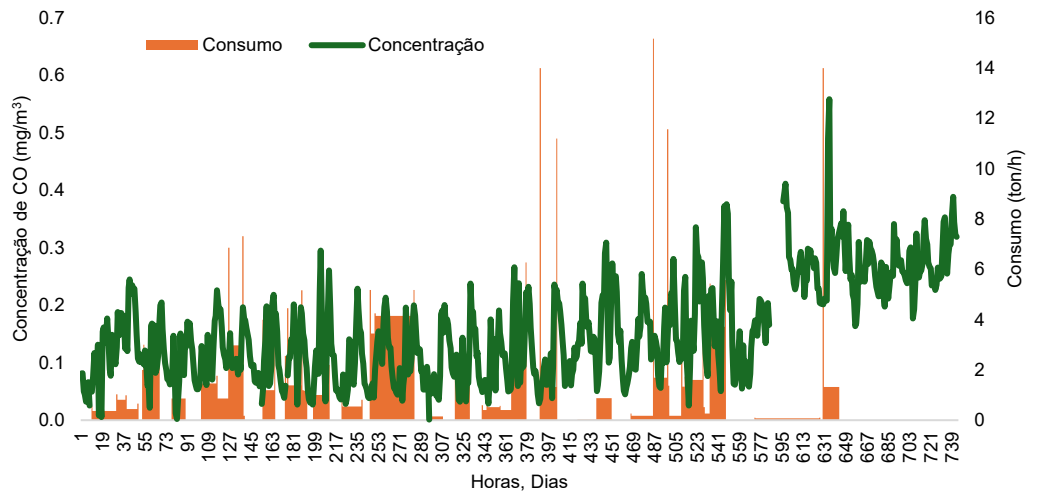
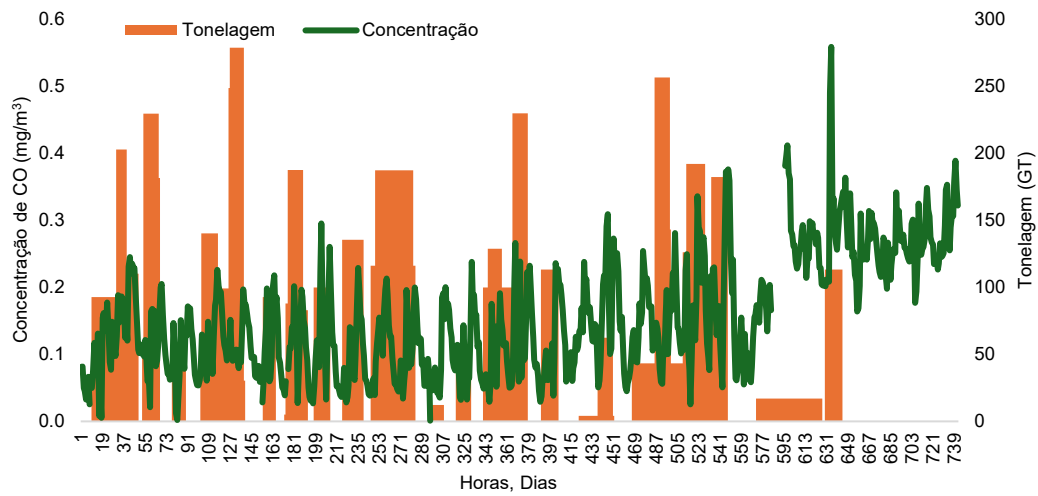


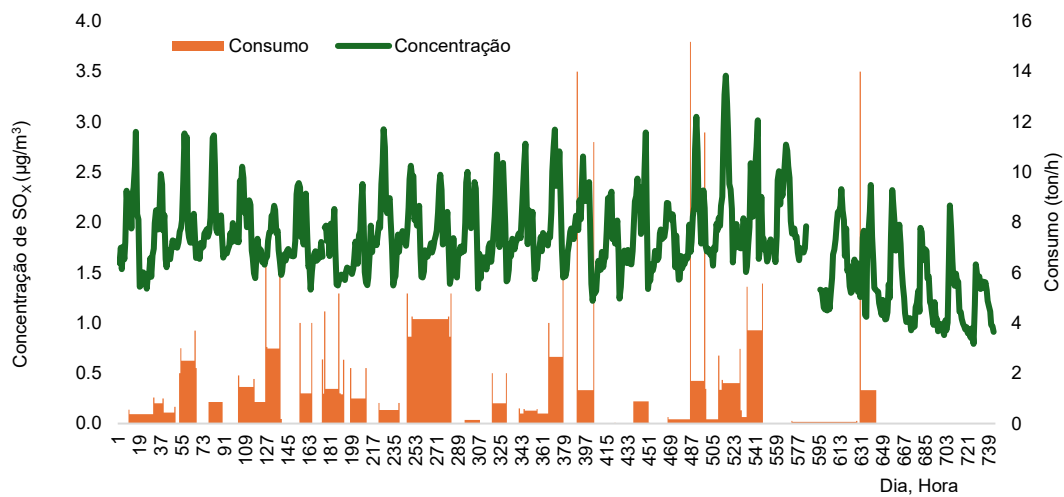
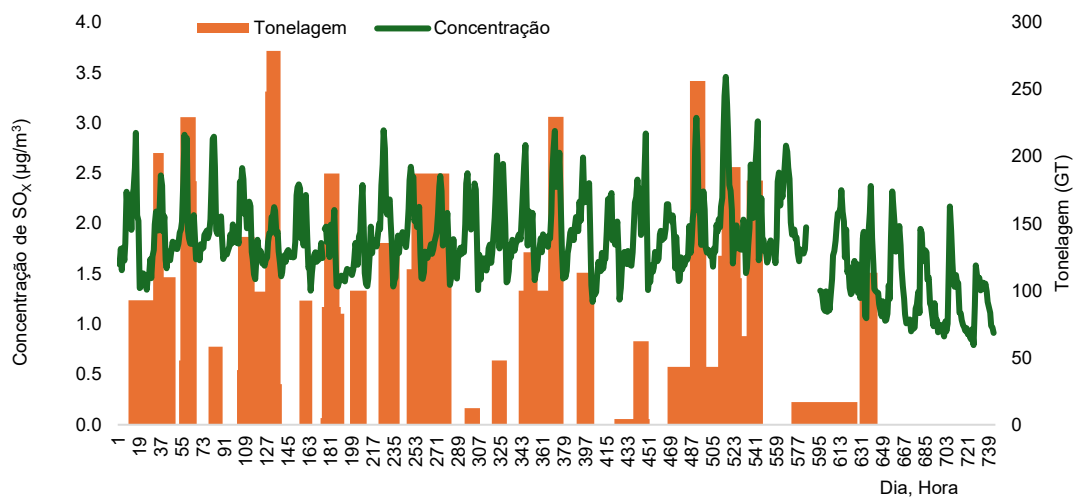
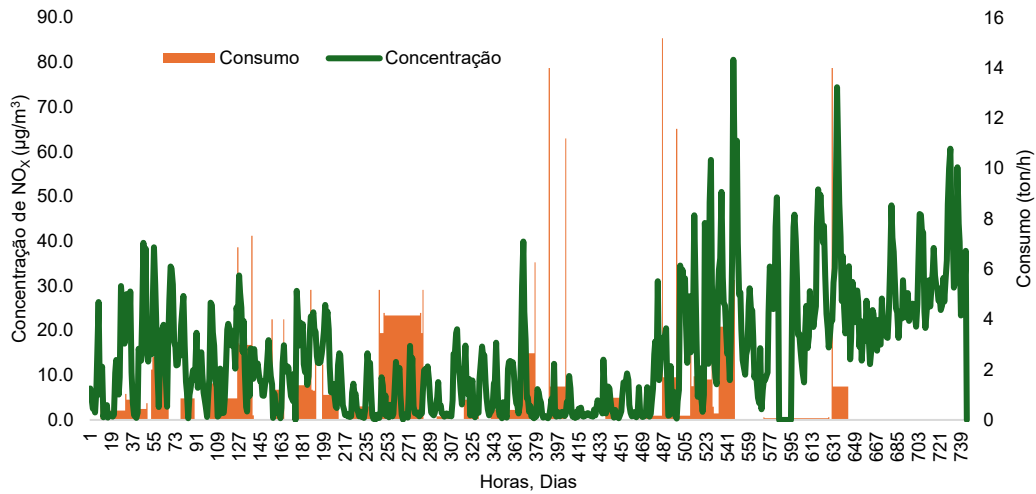


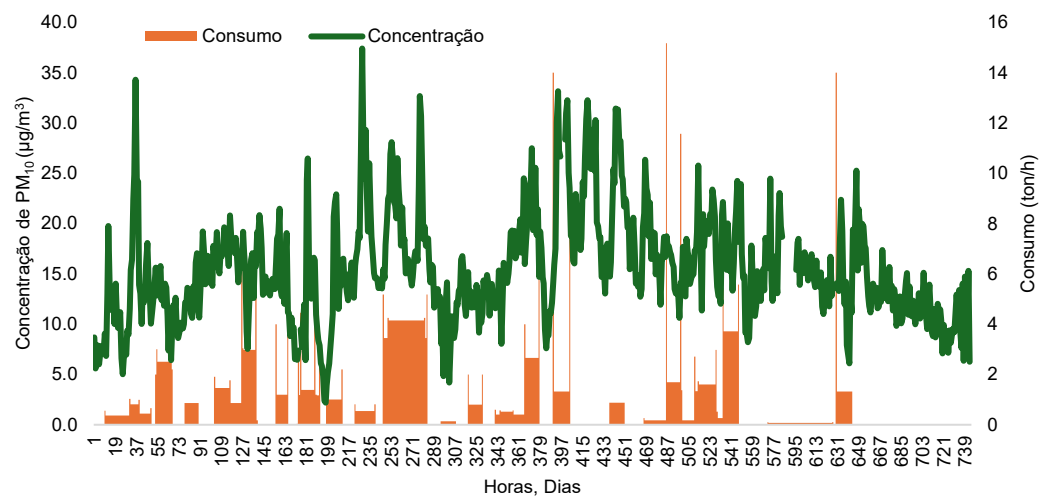
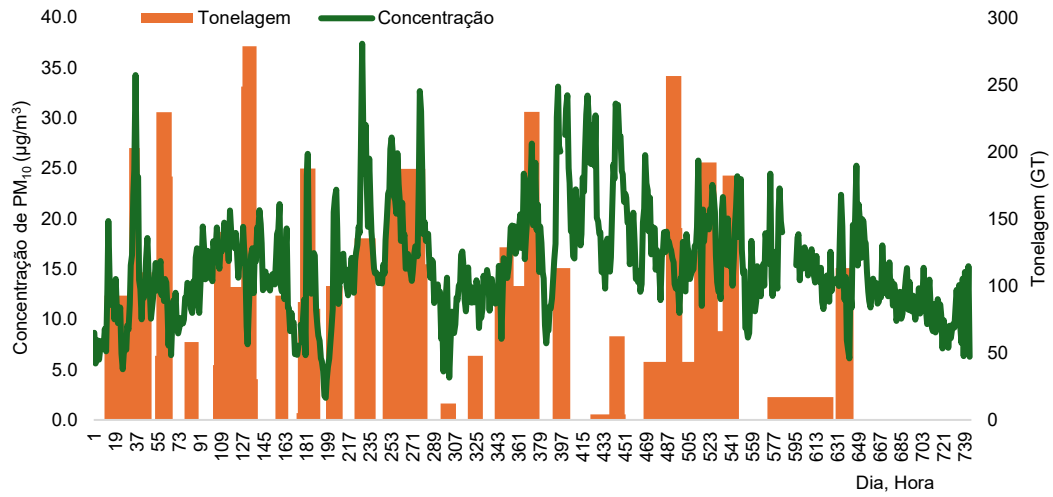


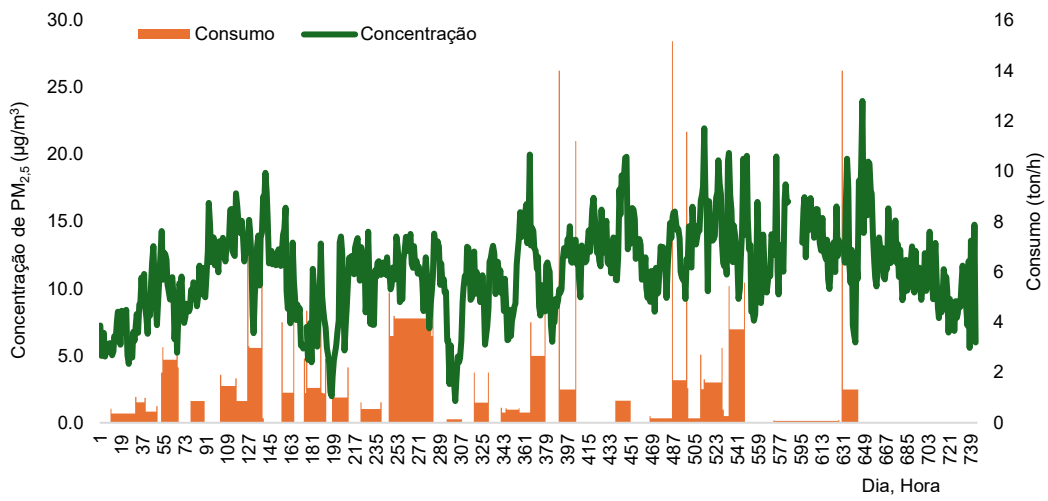
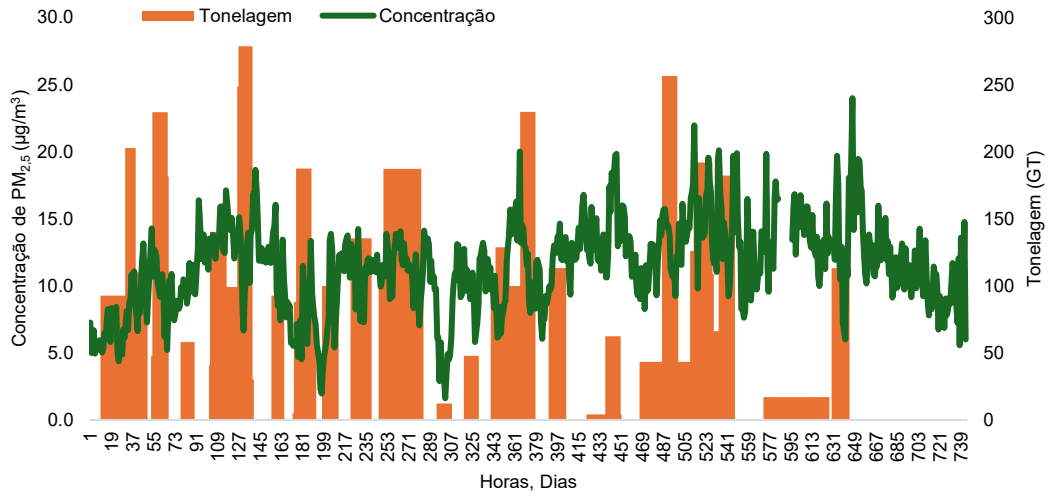


Anexo XV – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de maio segundo o consumo e a tonelage dos navios na “P2-Móvel”



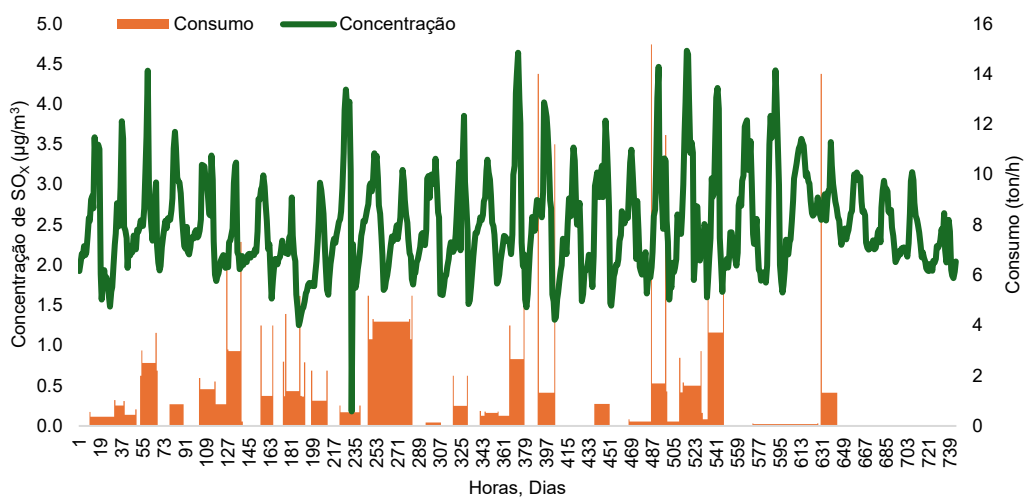
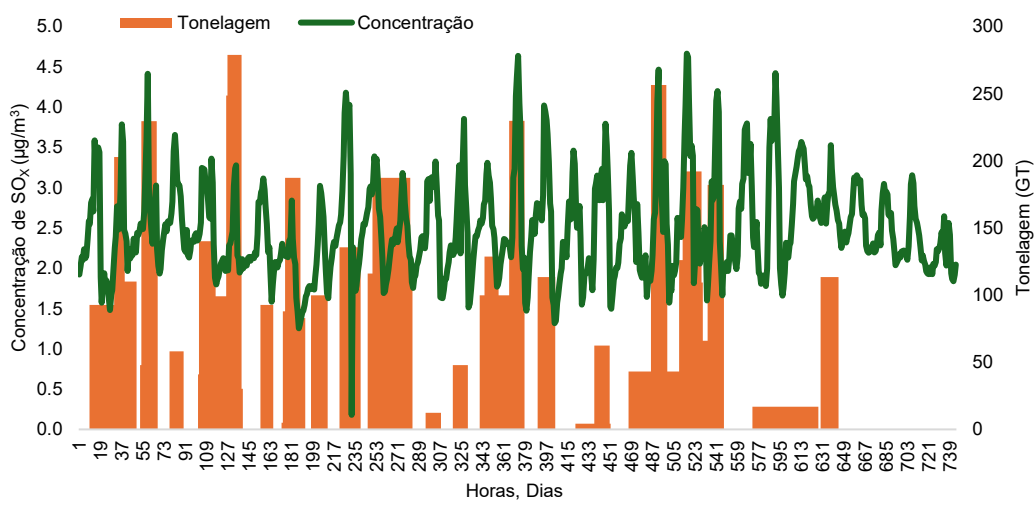
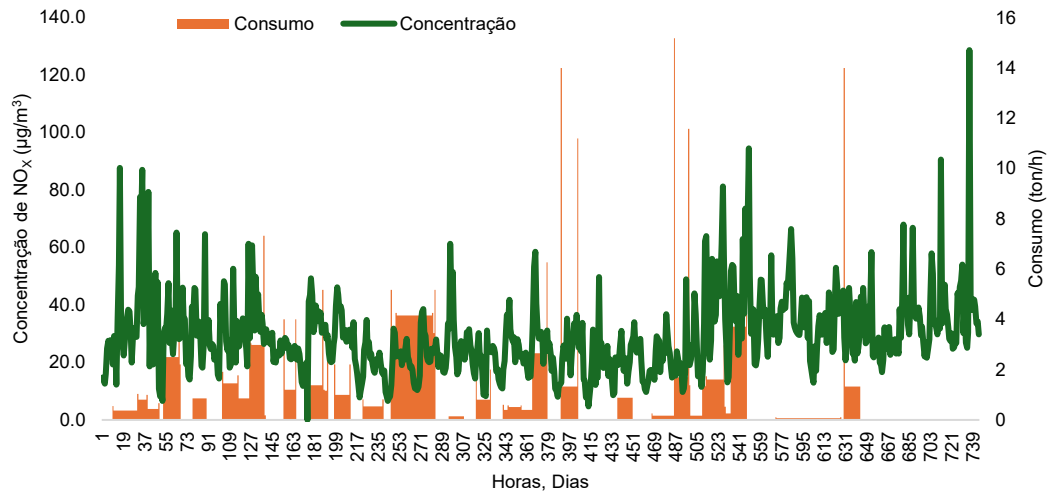


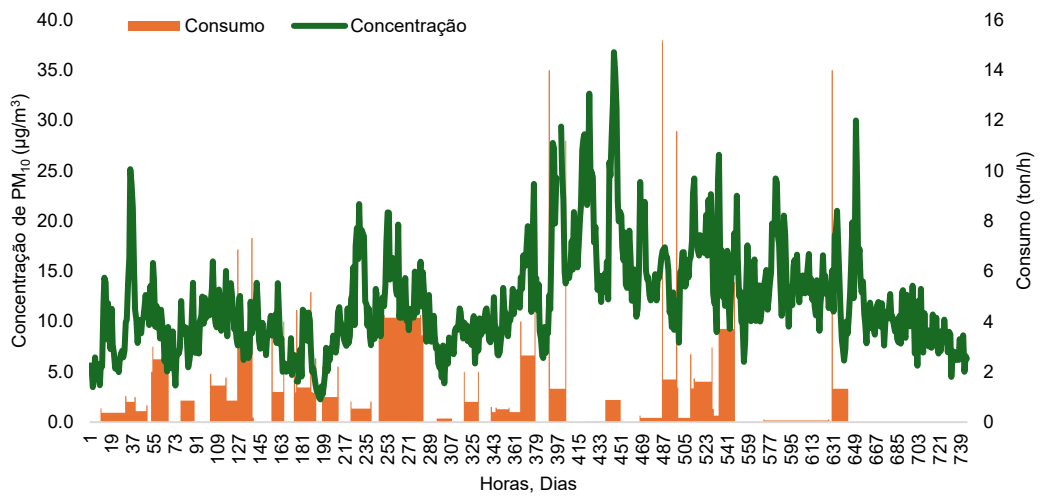
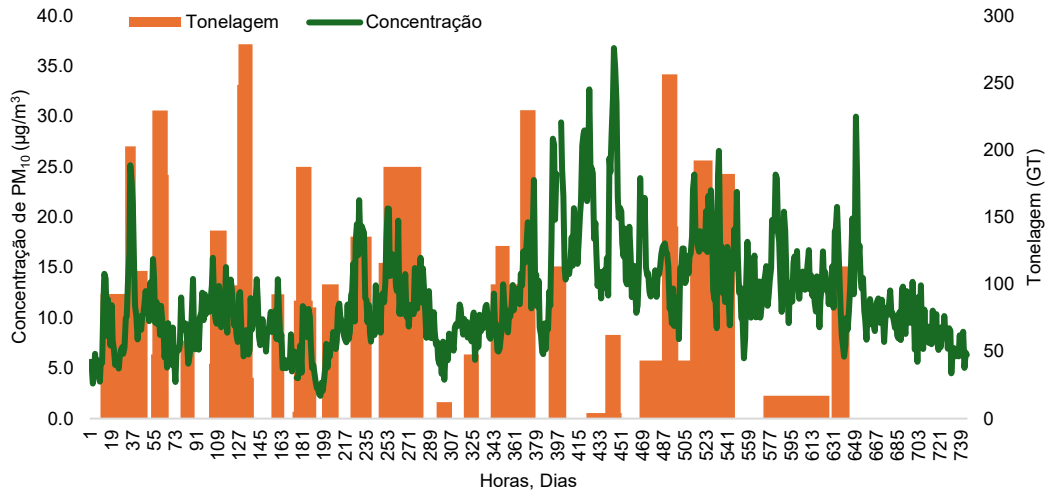


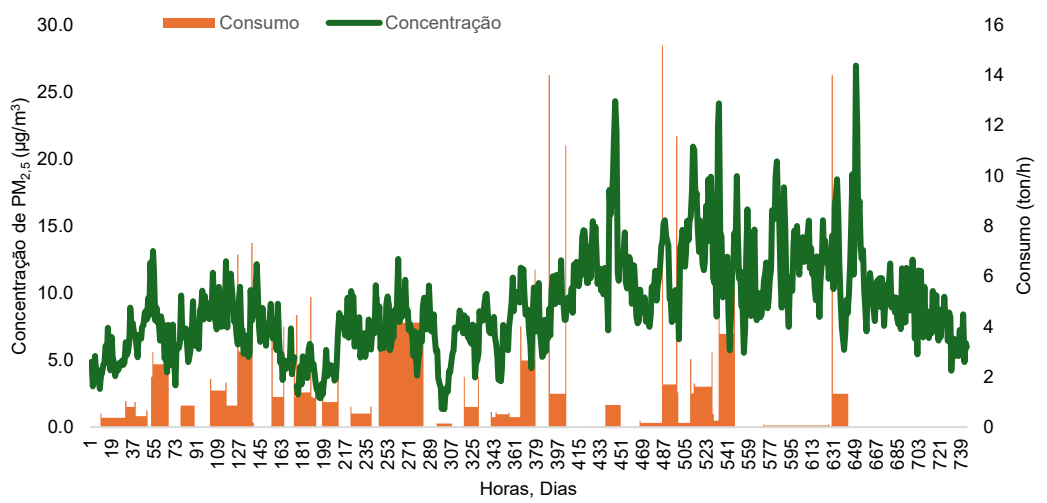
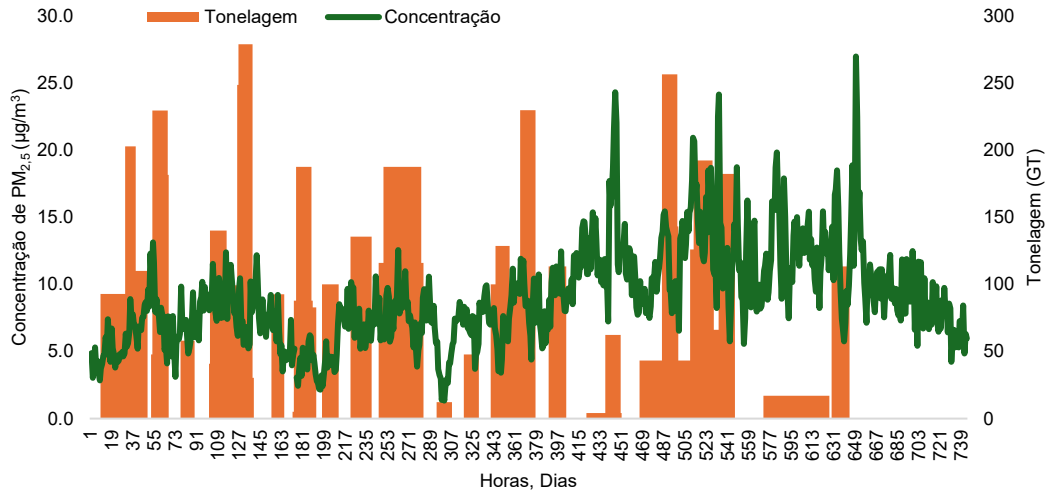


Anexo XVI – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de maio segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P3-Móvel”

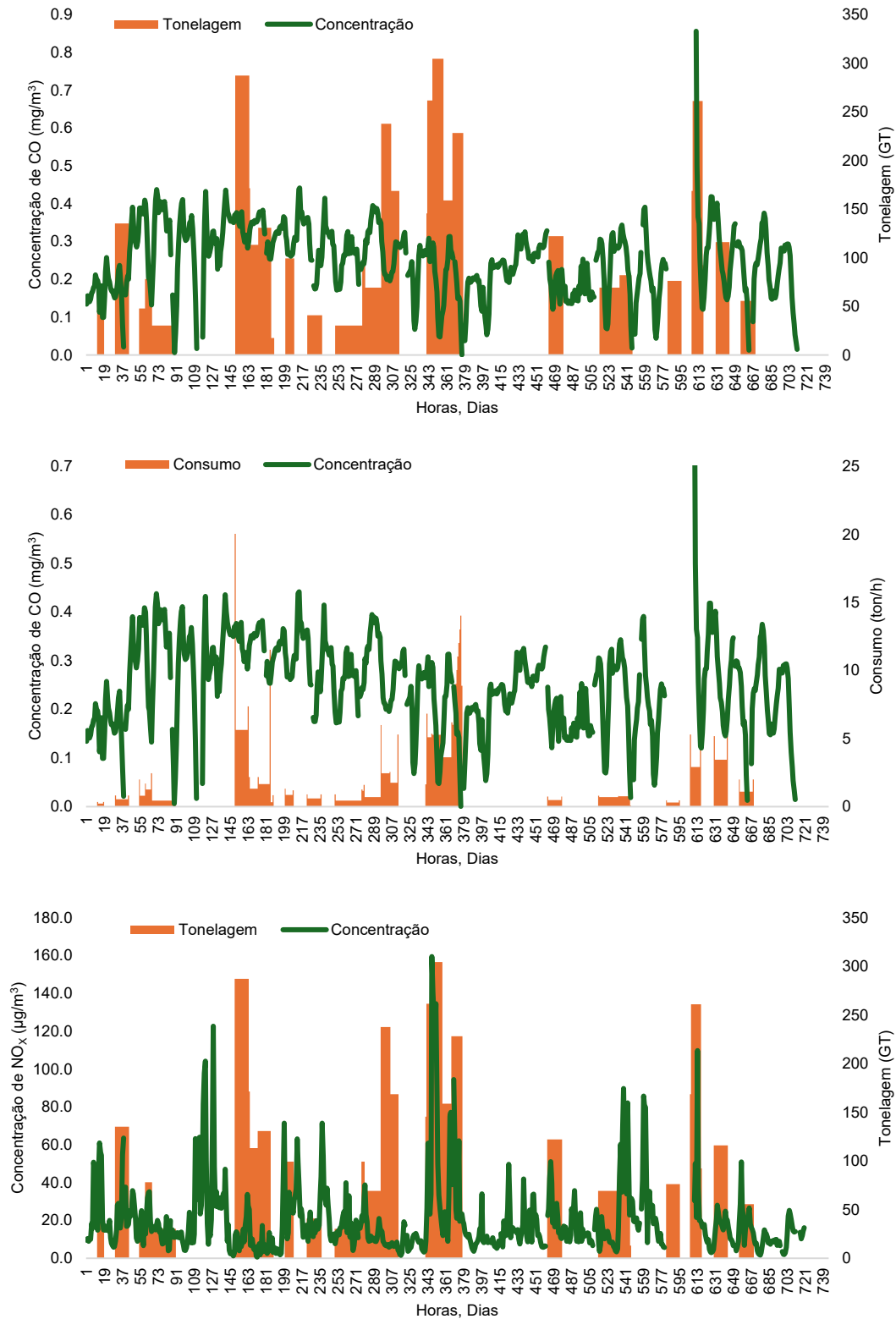


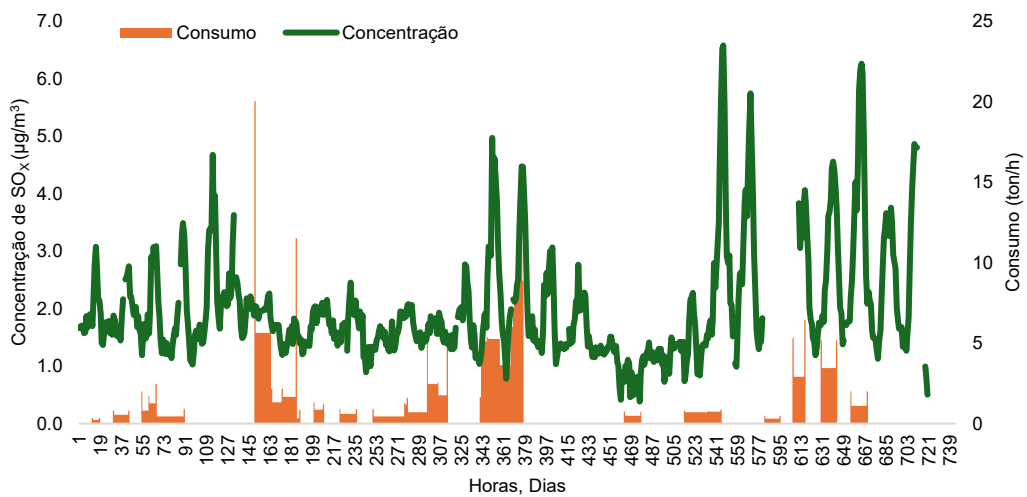
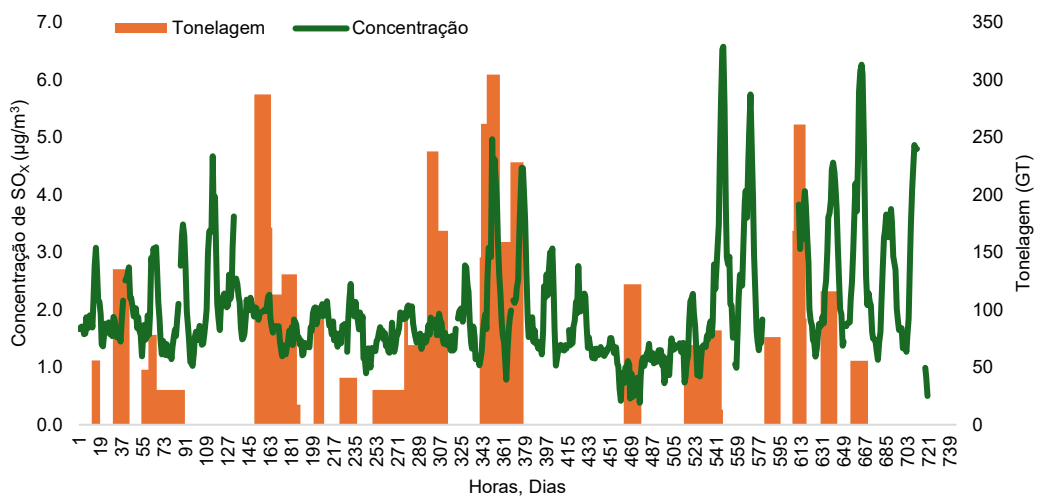
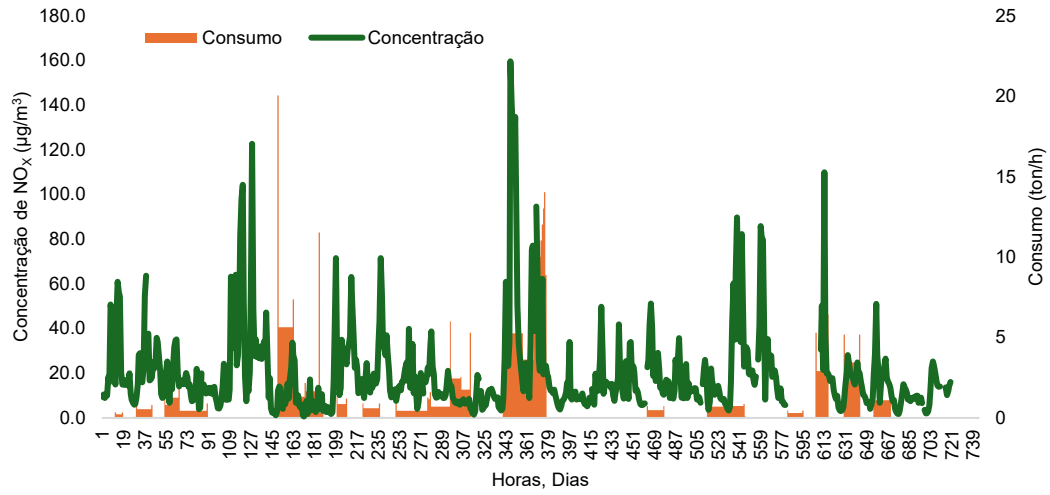


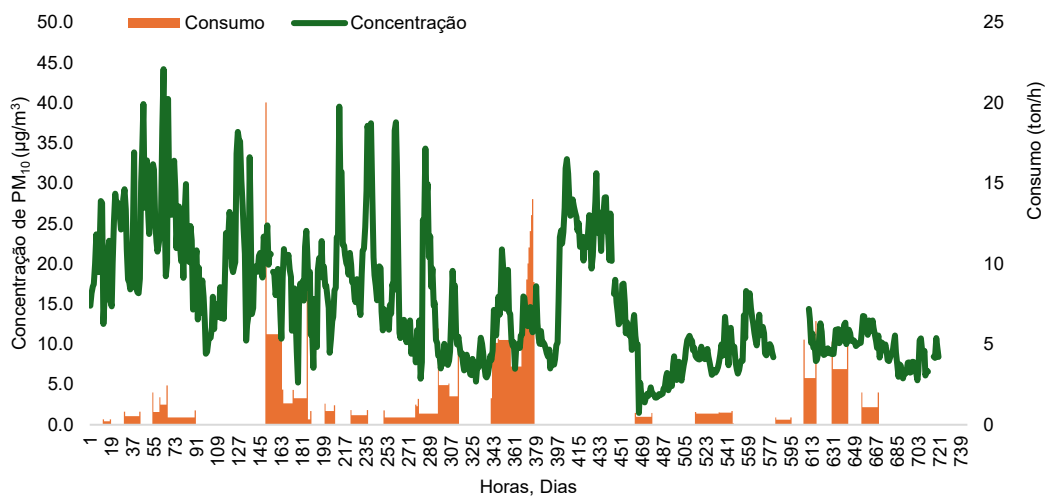
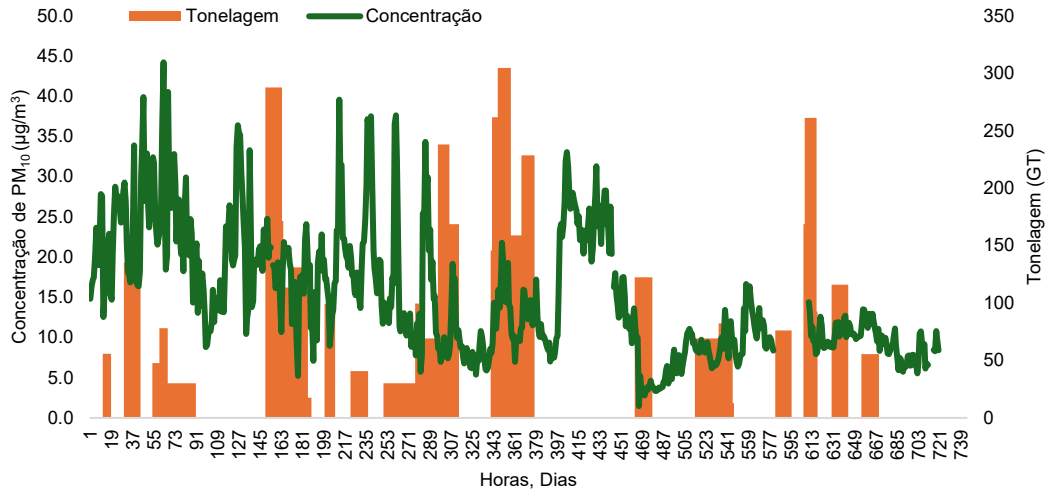


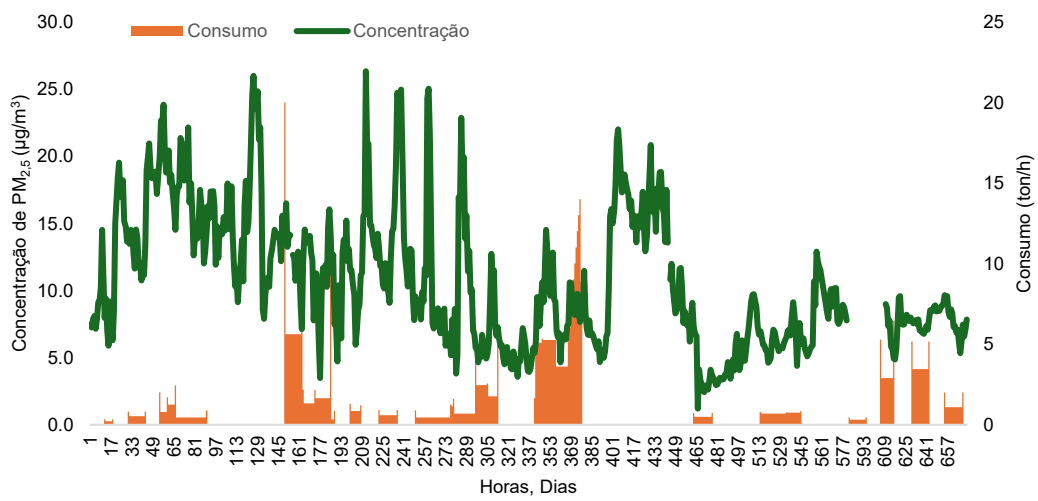
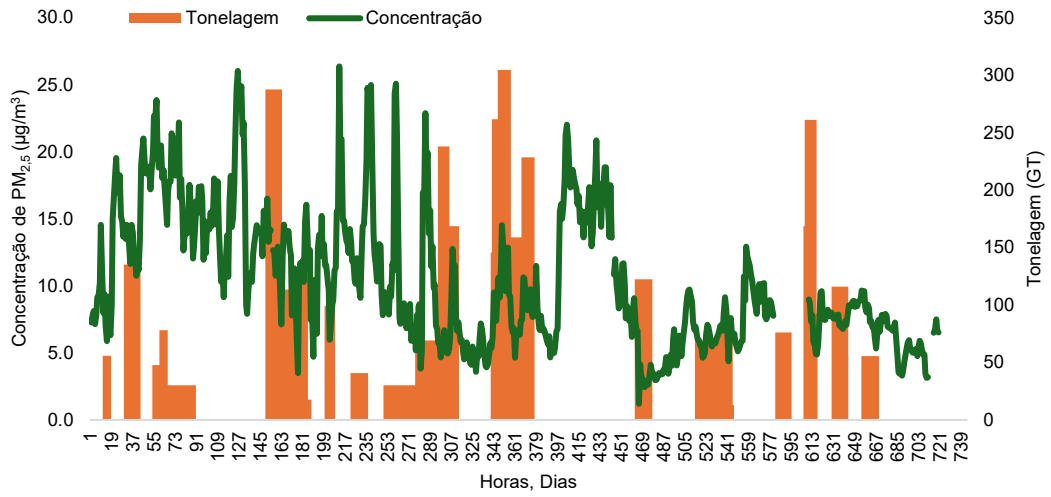


Anexo XVII – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de junho segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “Estação-Física”

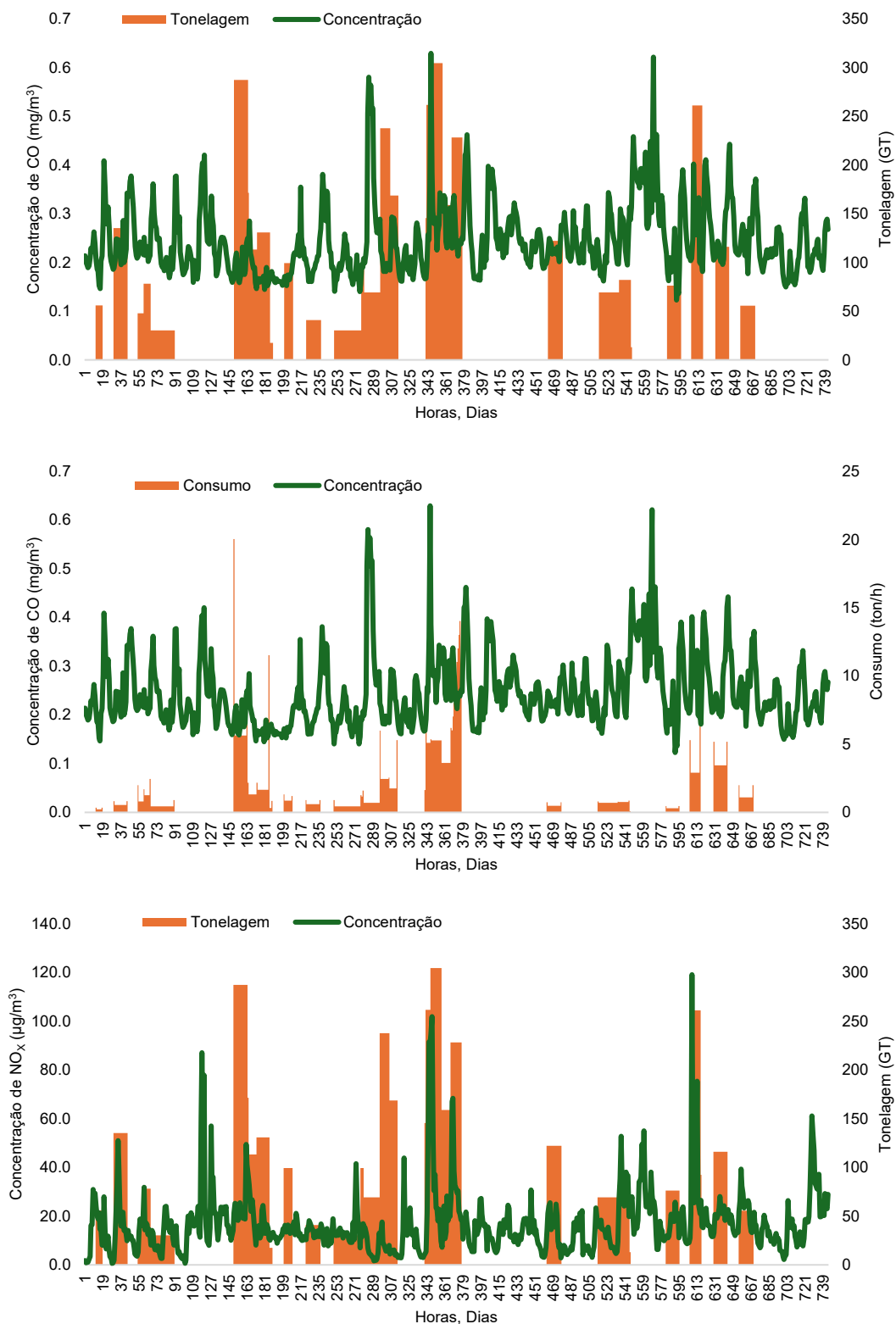


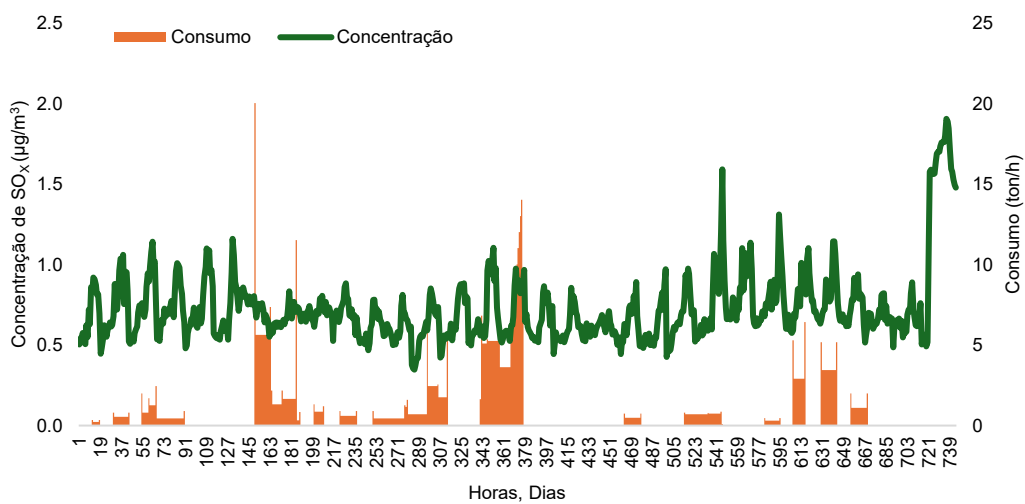
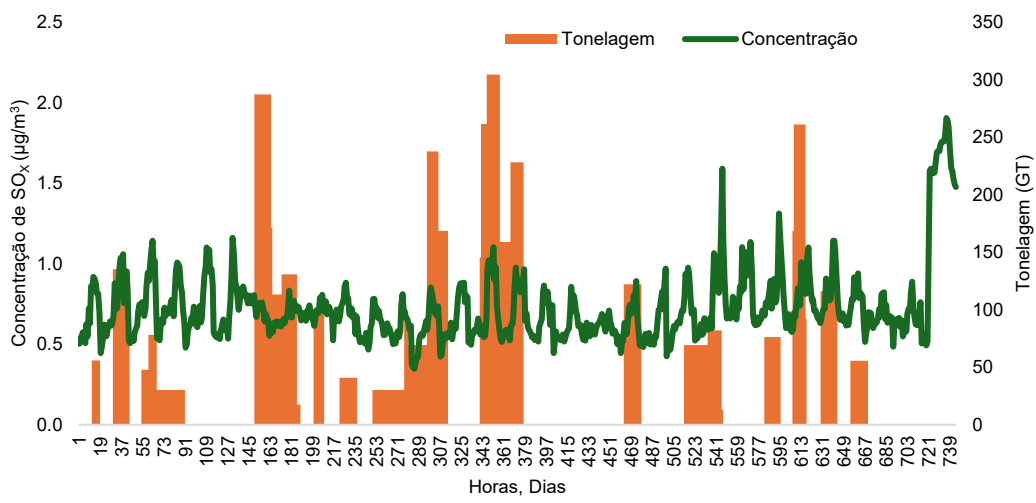
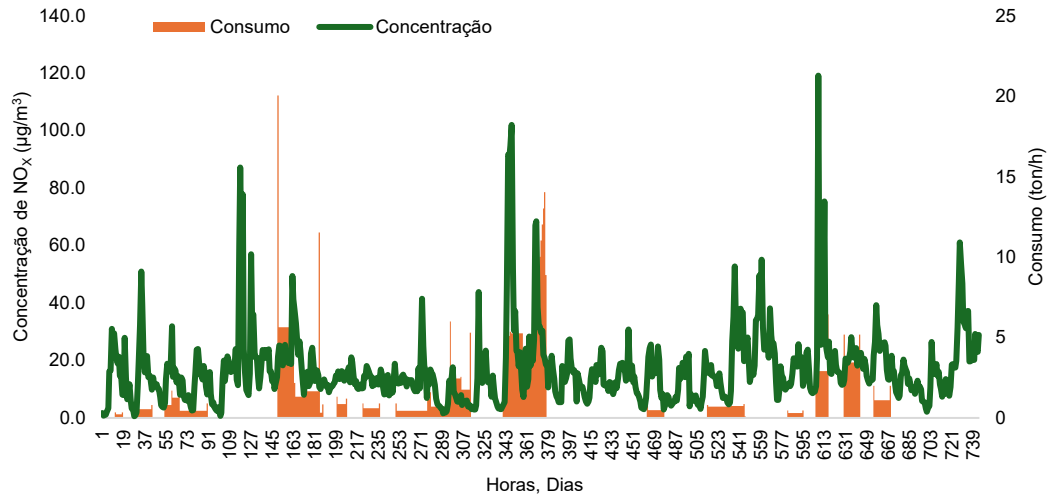


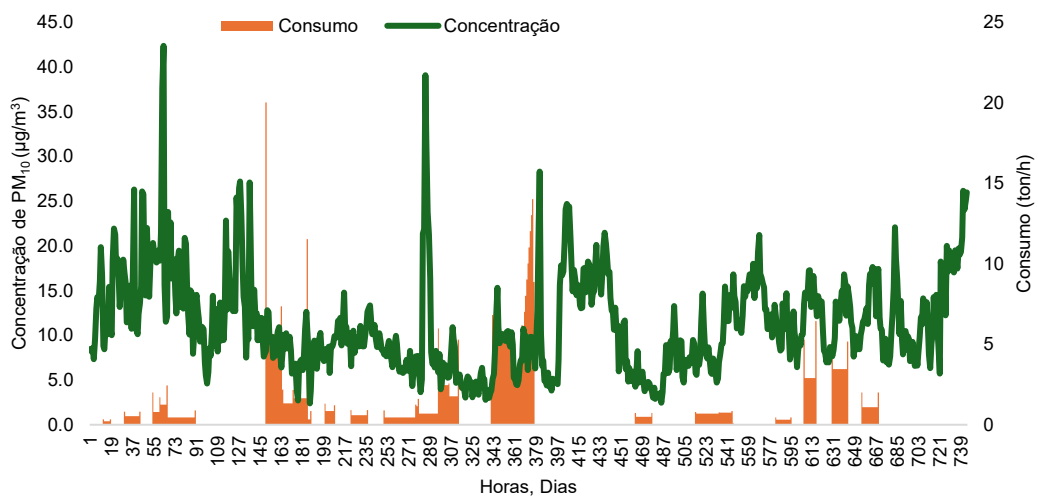
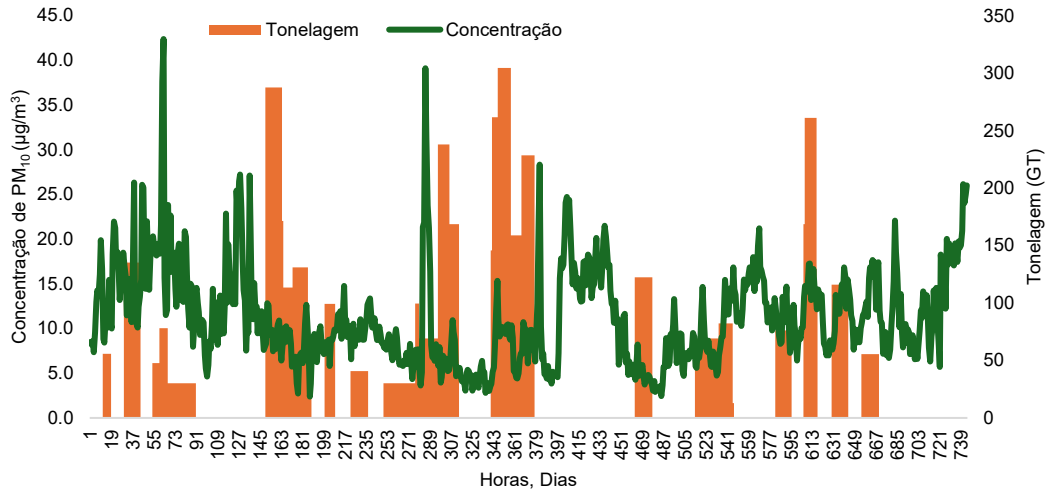


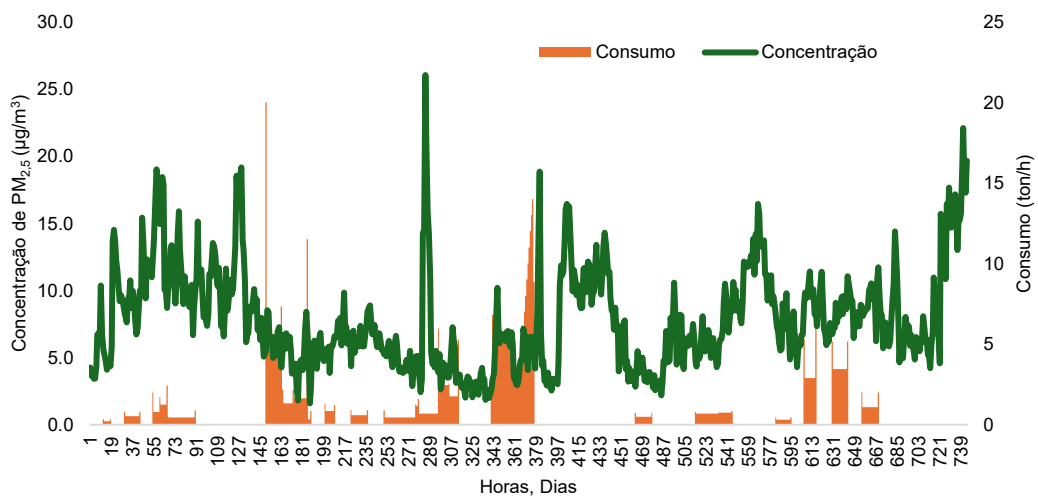
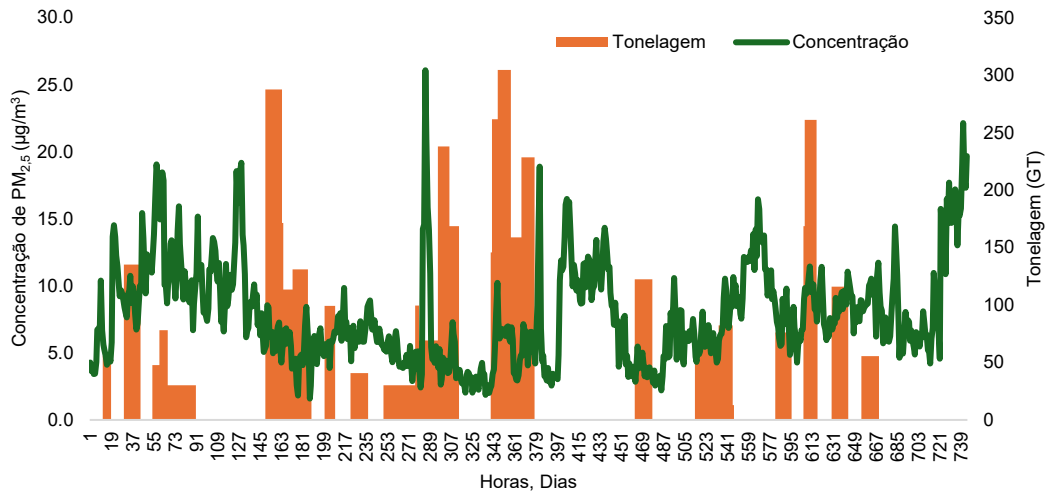


Anexo XVIII – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de junho segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P1-Móvel”

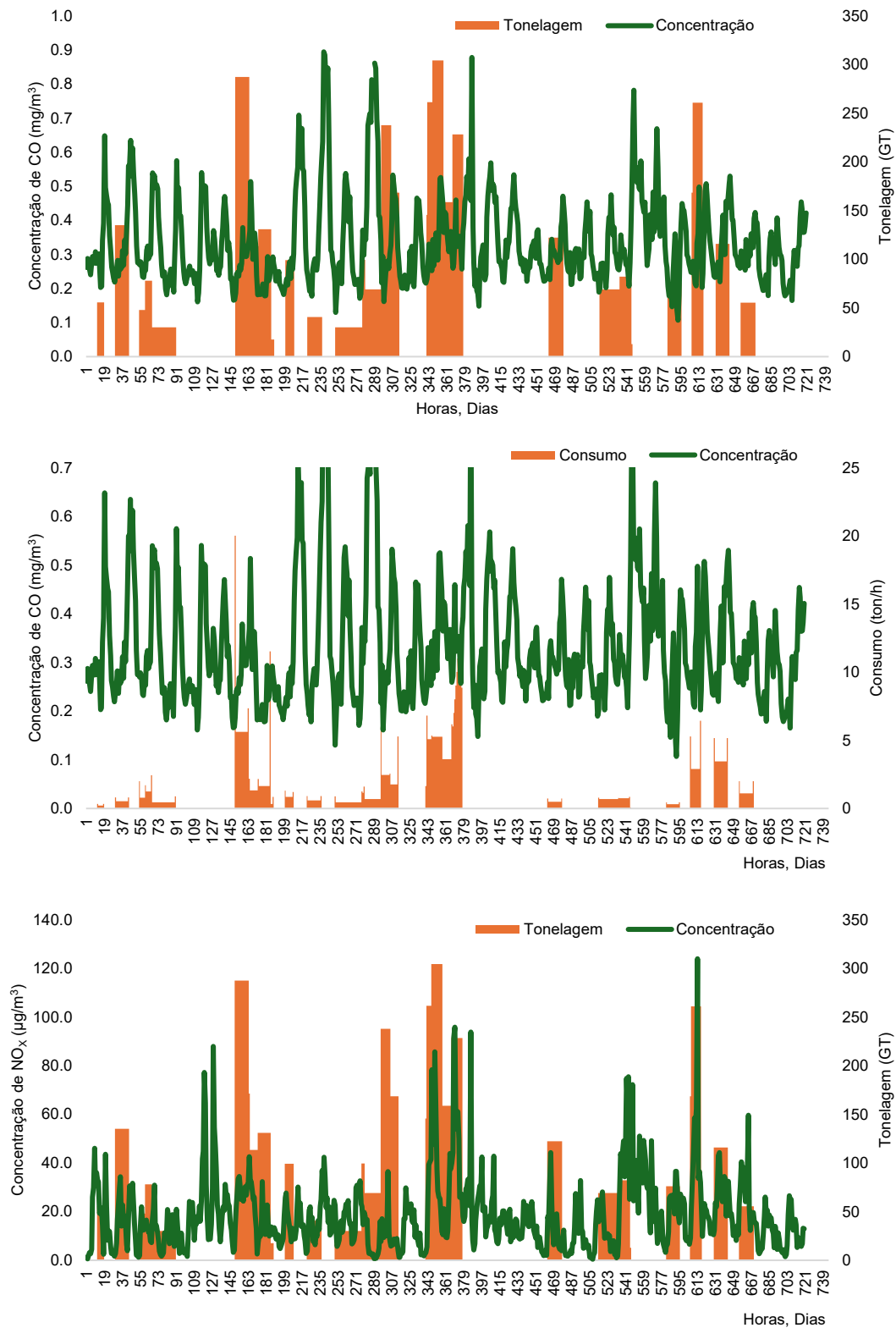


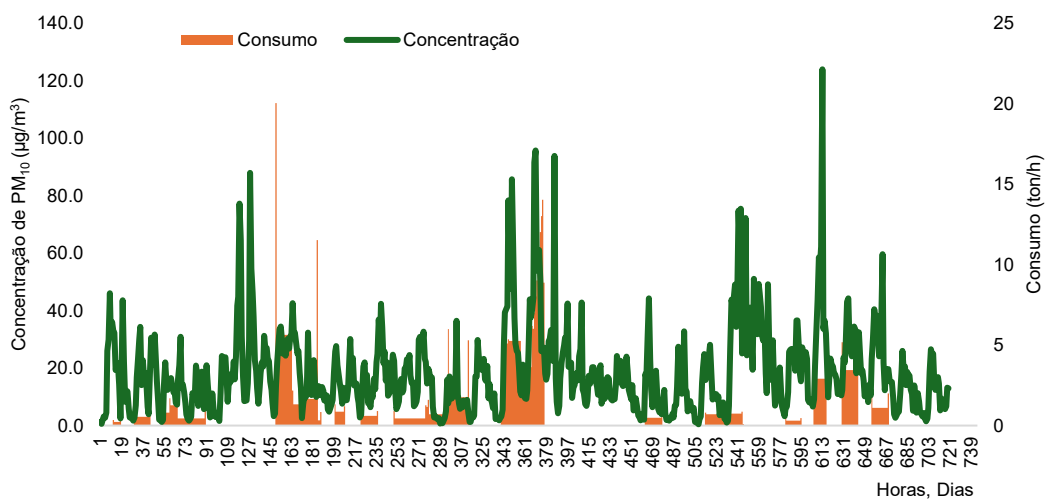
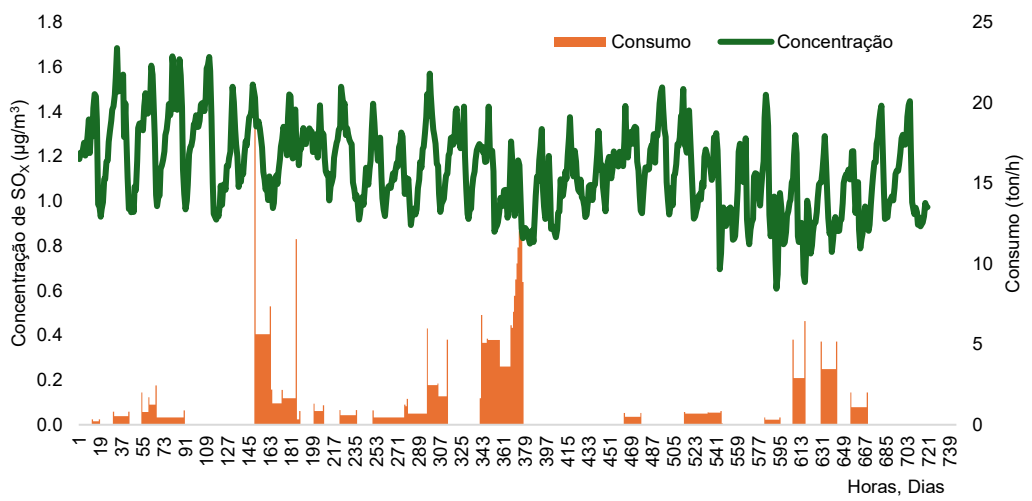
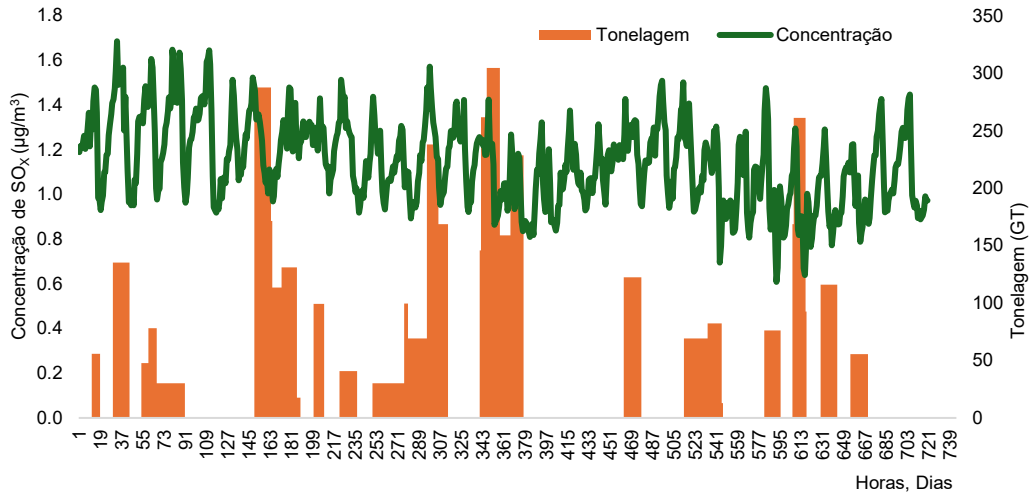


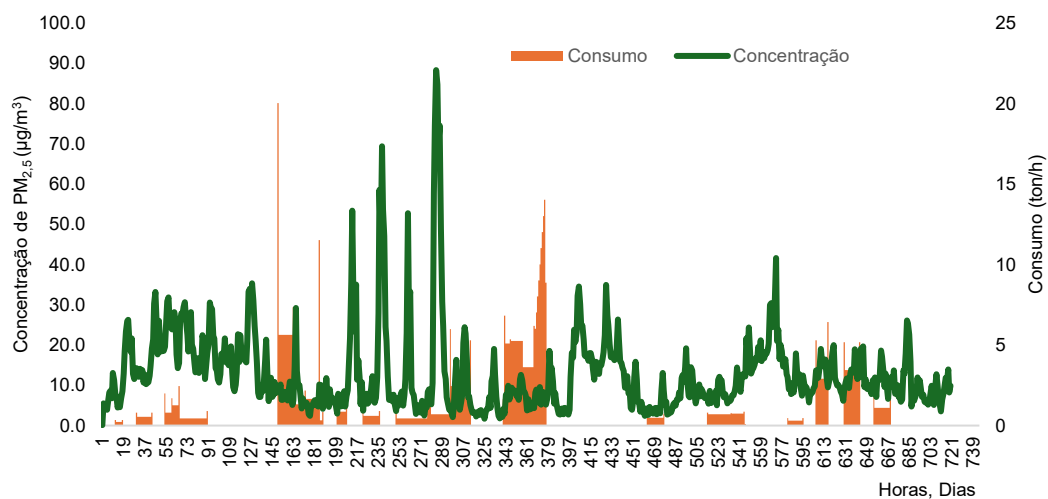
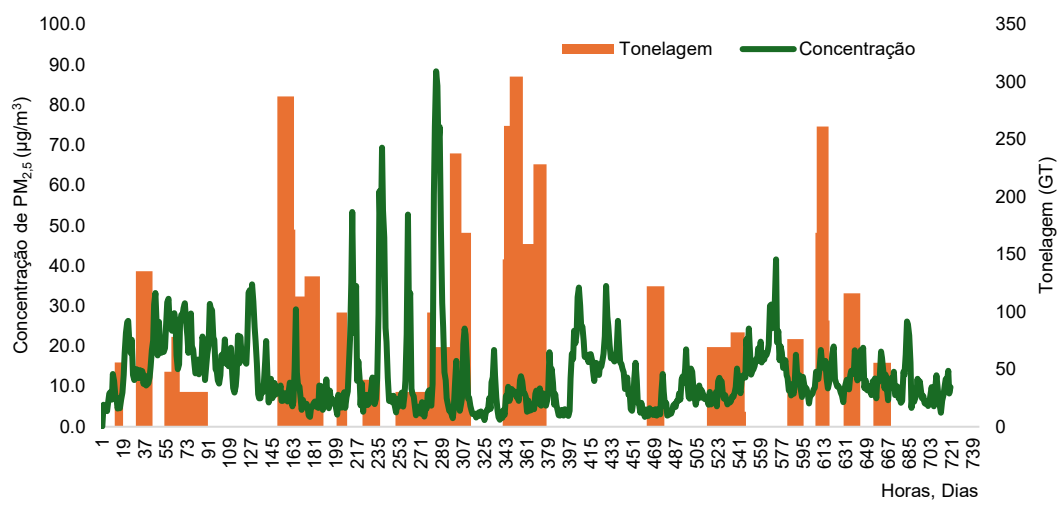
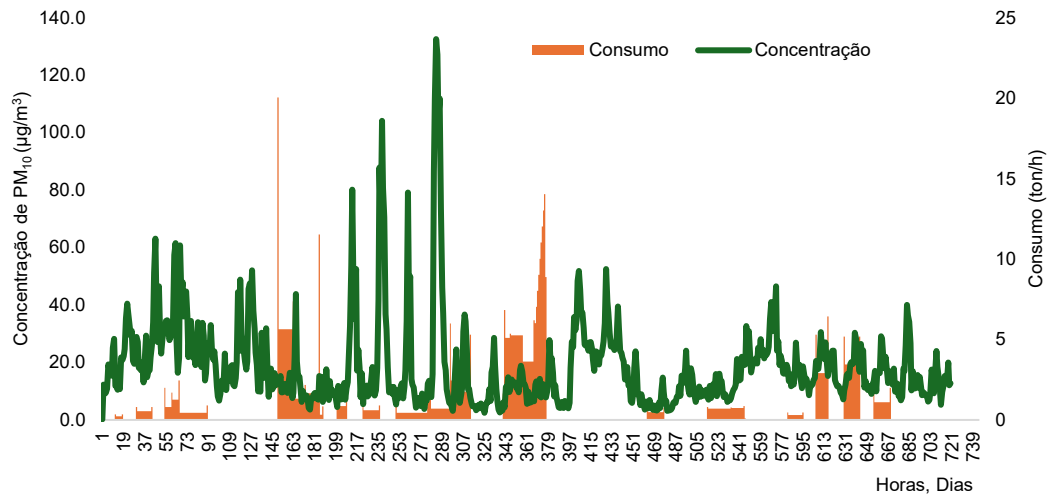




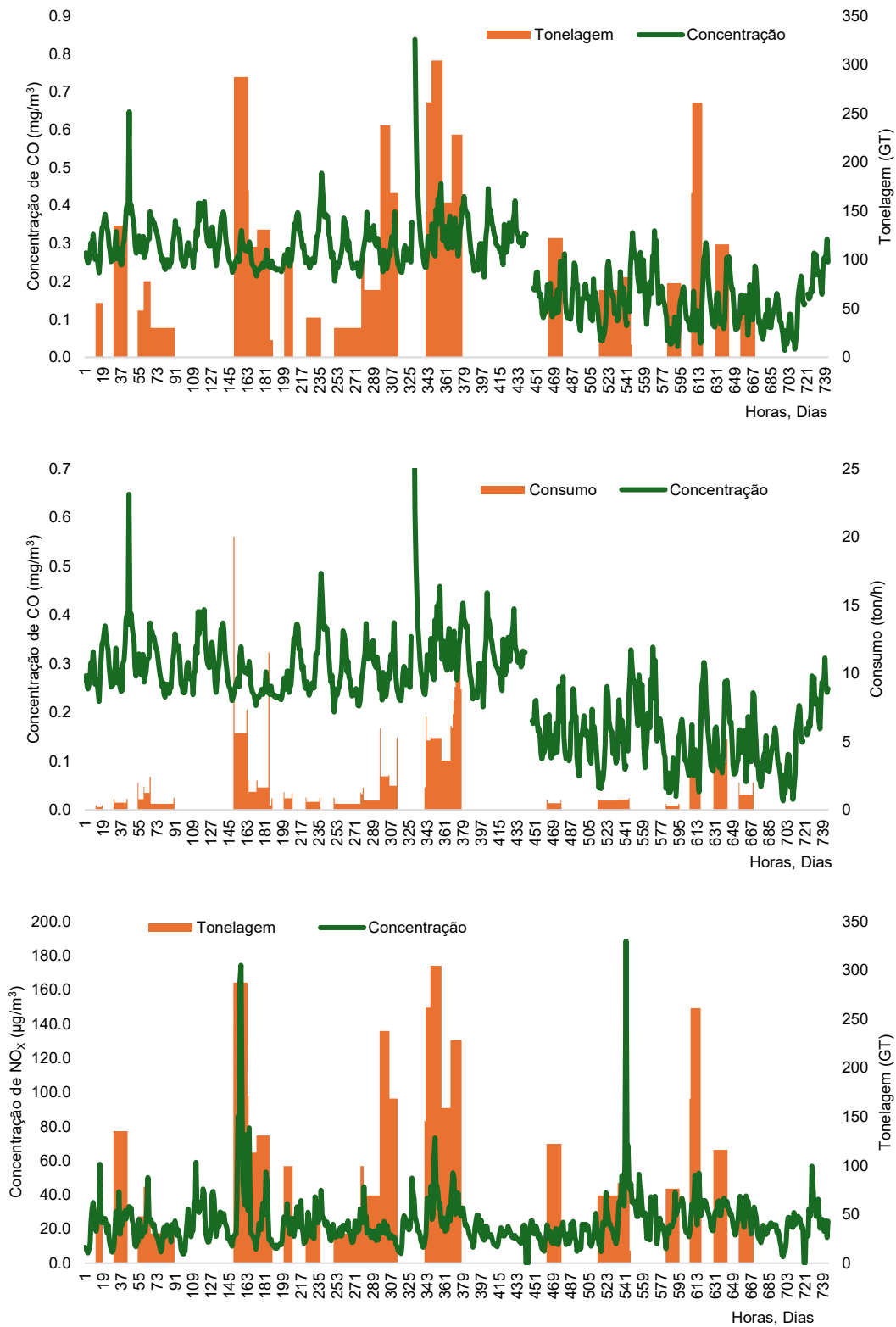
Anexo XIX – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de junho segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P2-Móvel”

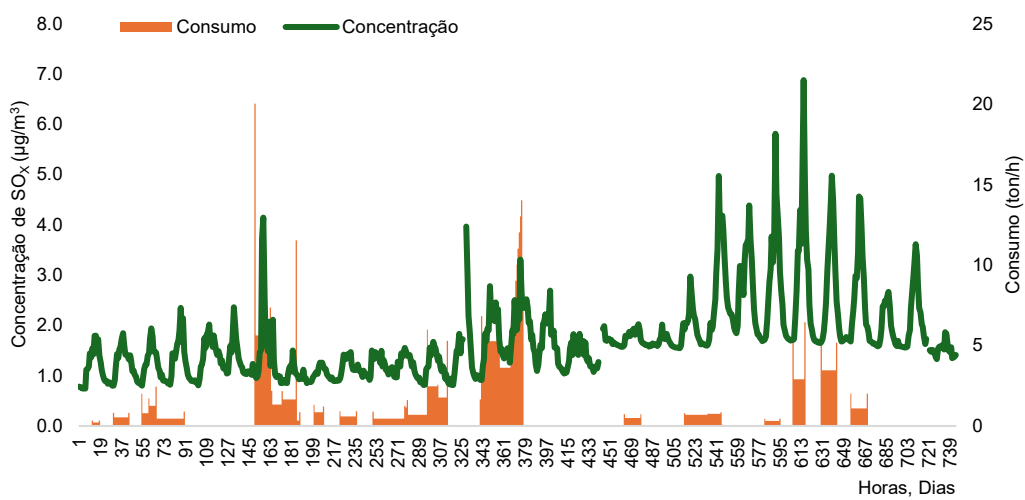
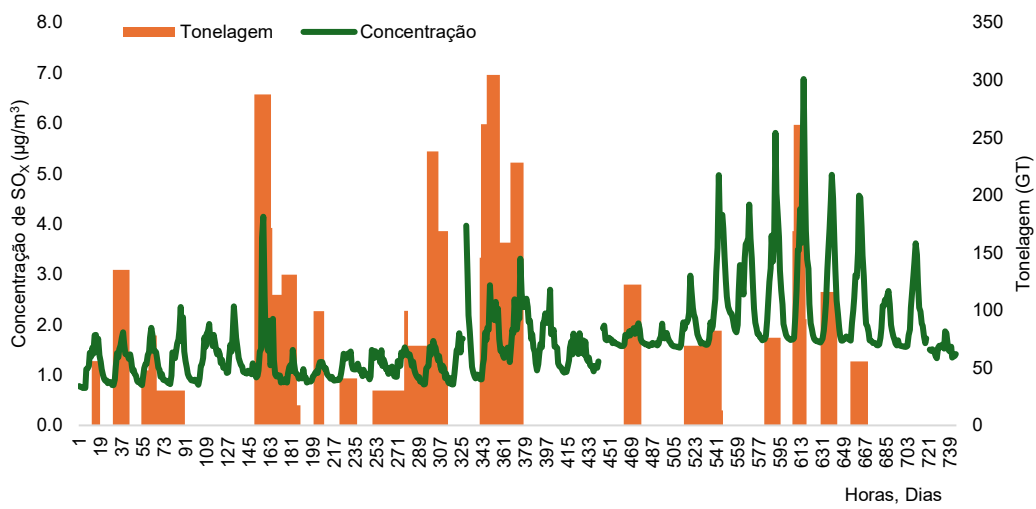
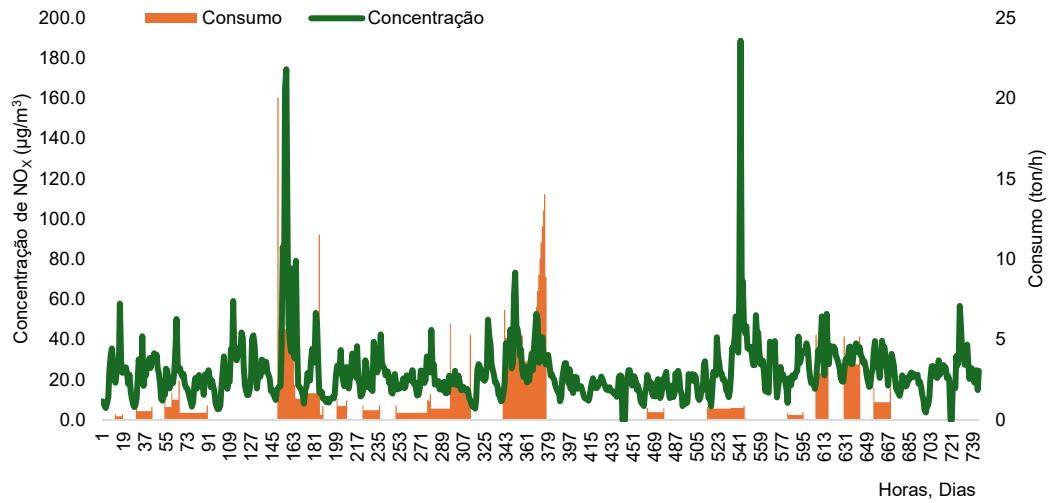


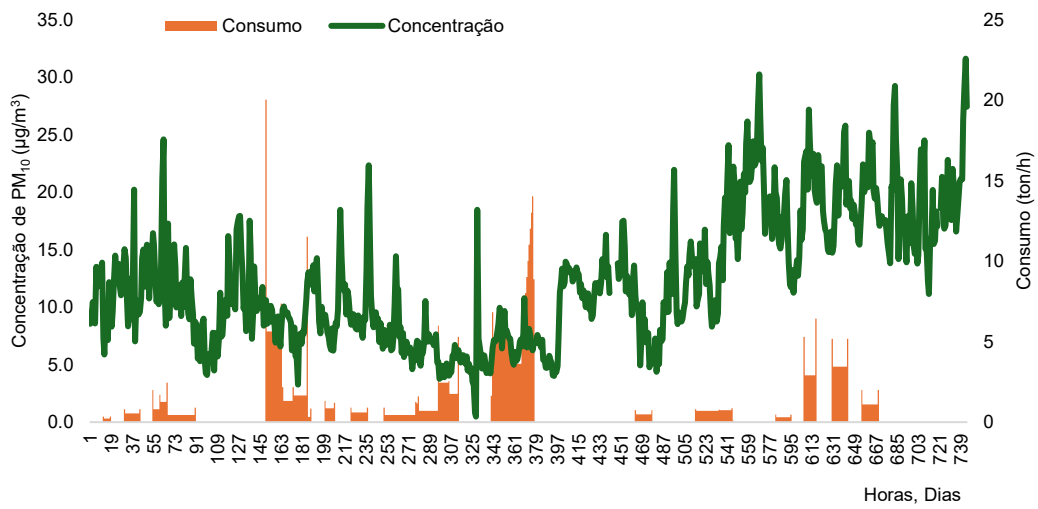
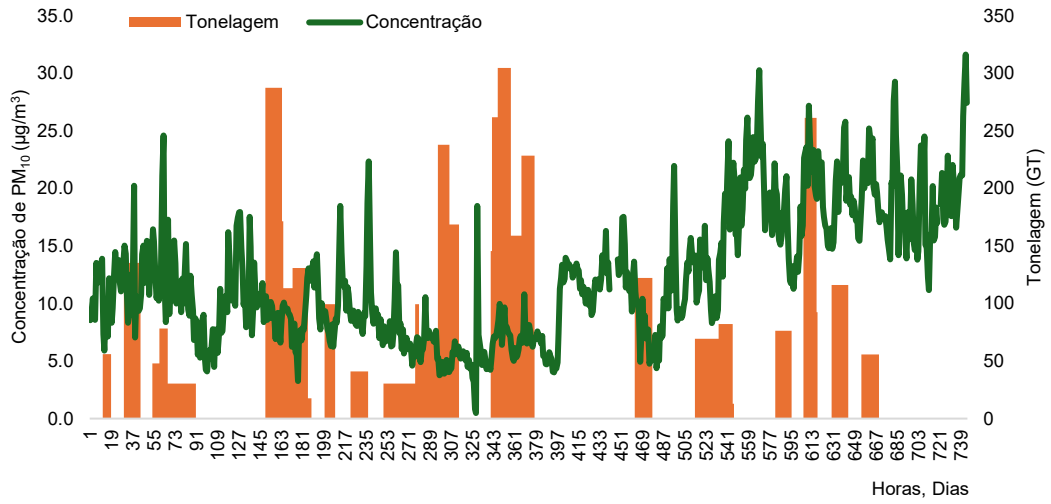


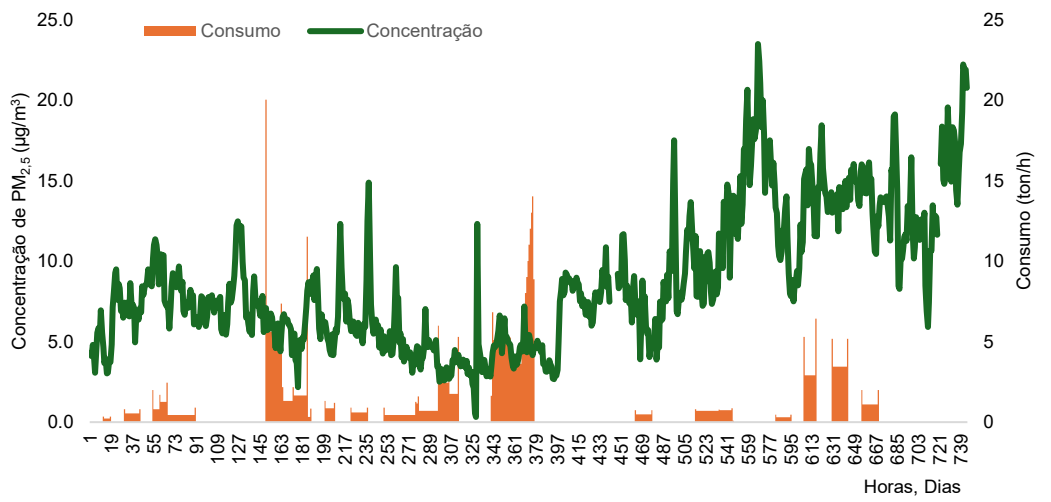
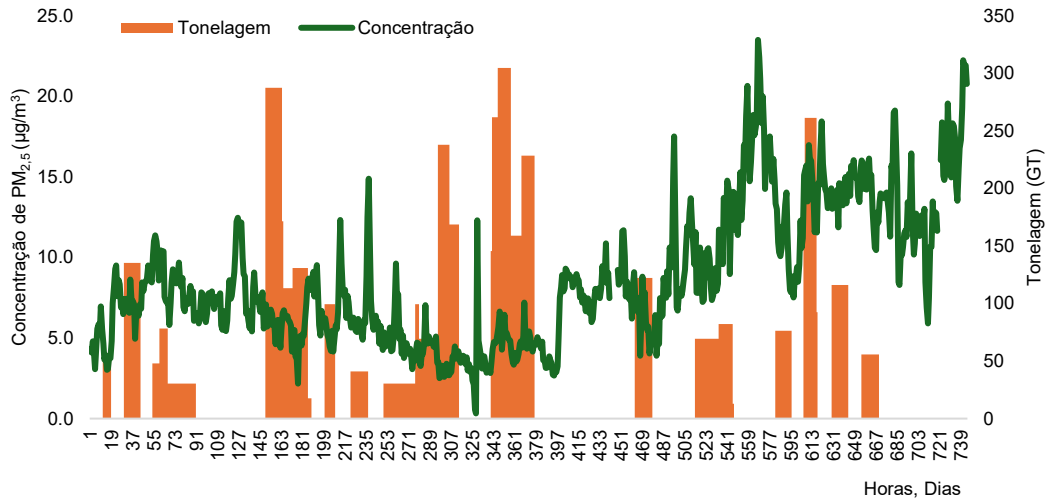


Anexo XX – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de junho segundo o consumo e a tonelage dos navios na “P3-Móvel”

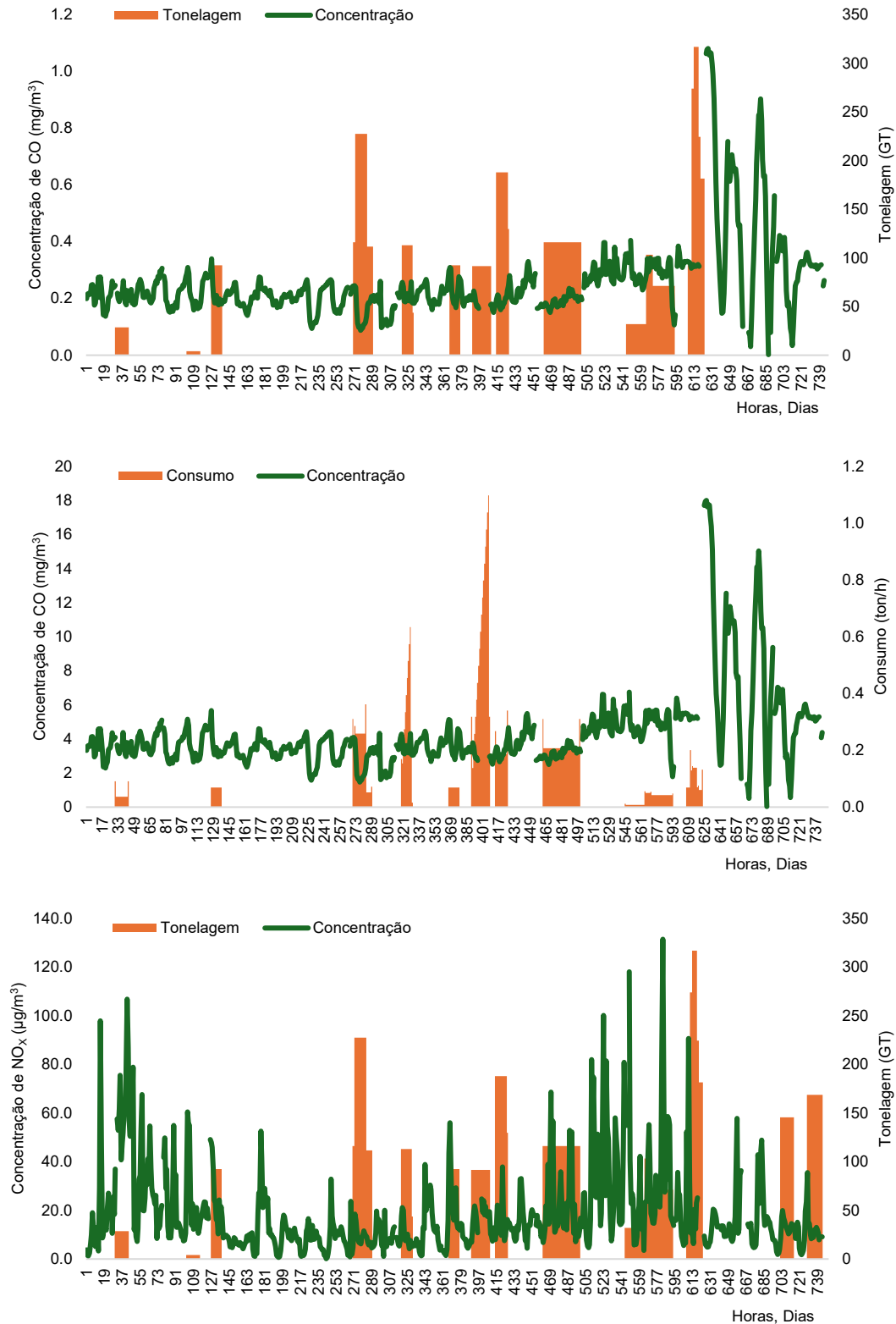


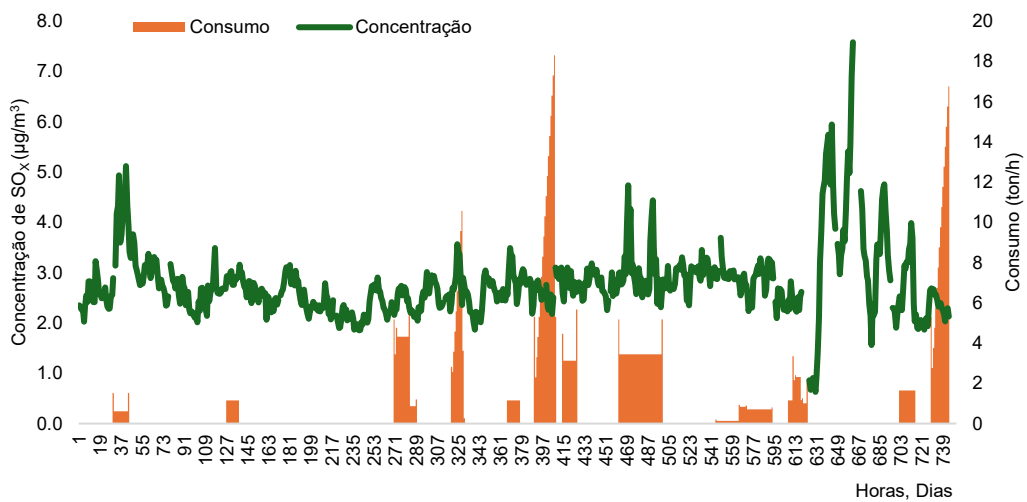
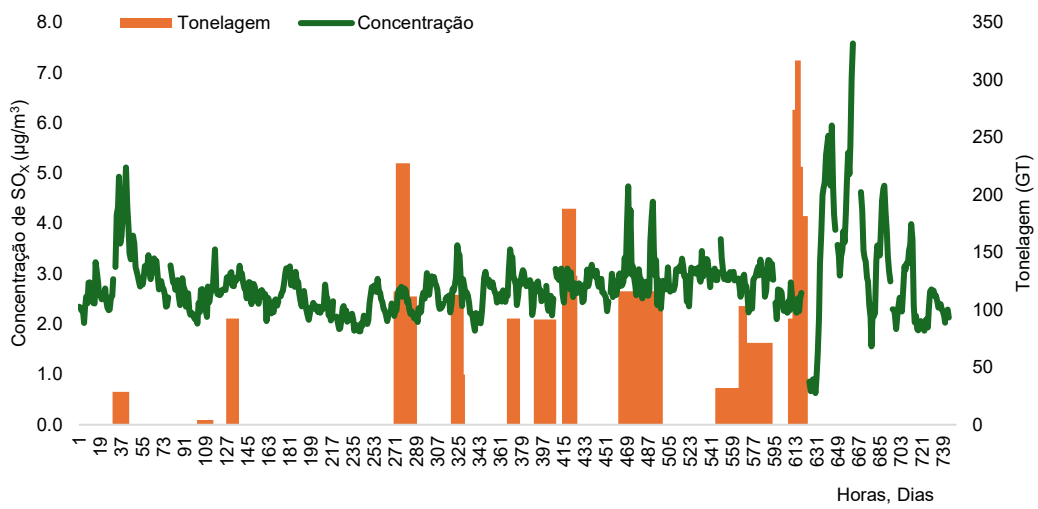
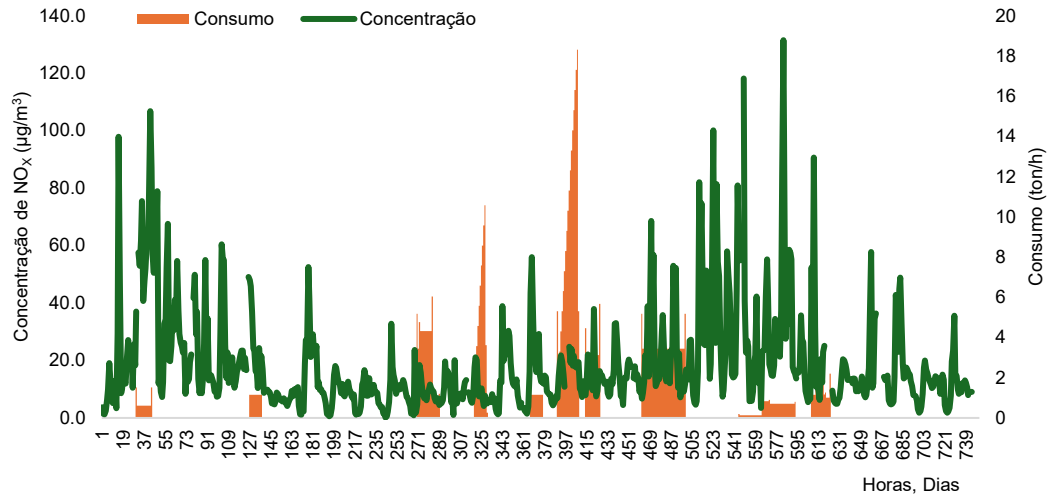


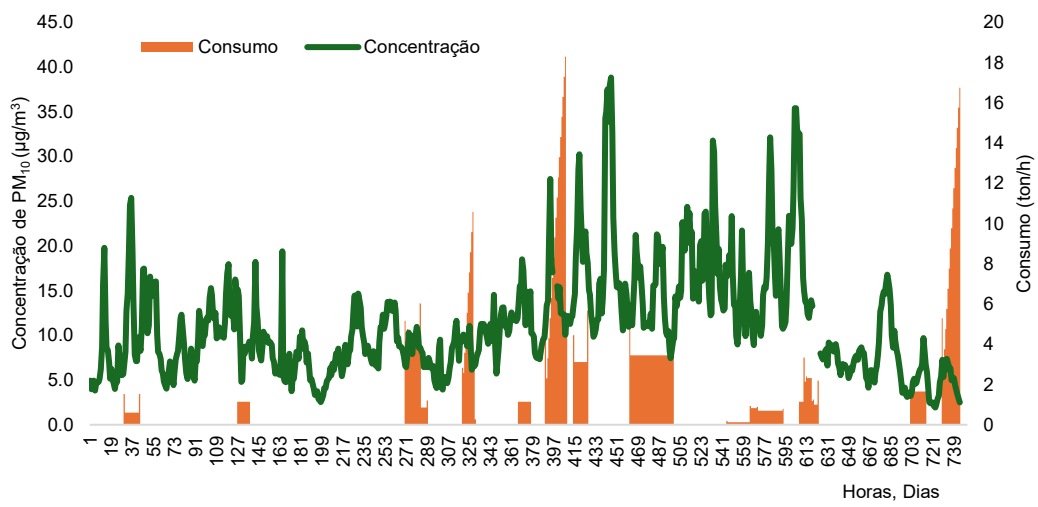
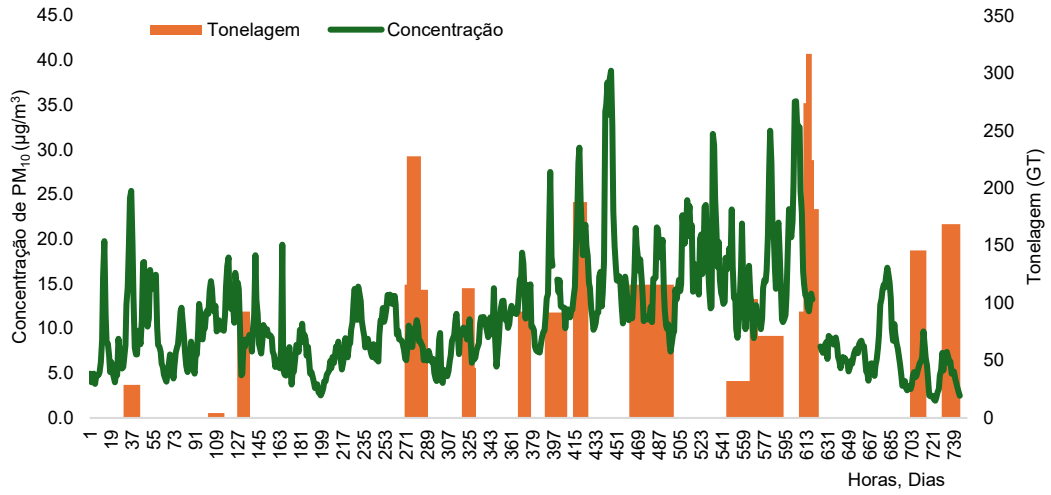


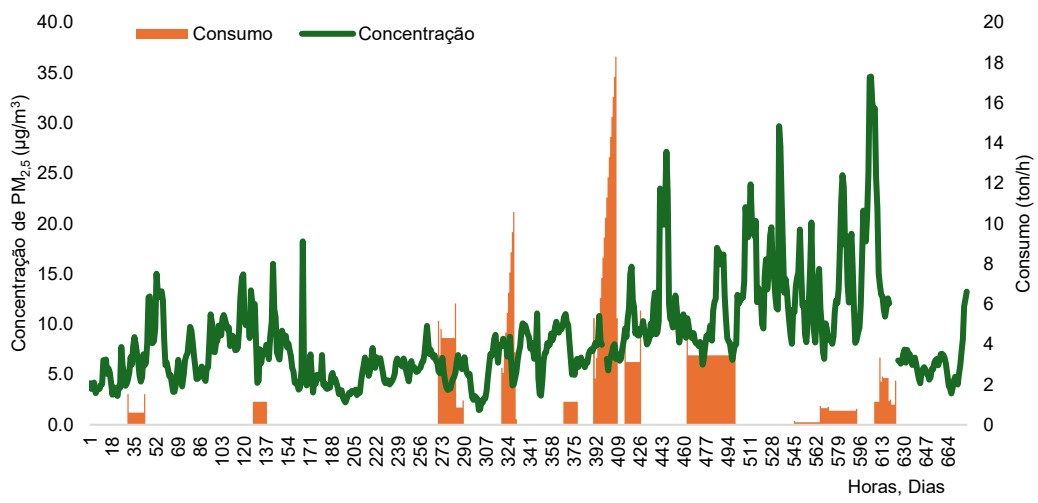
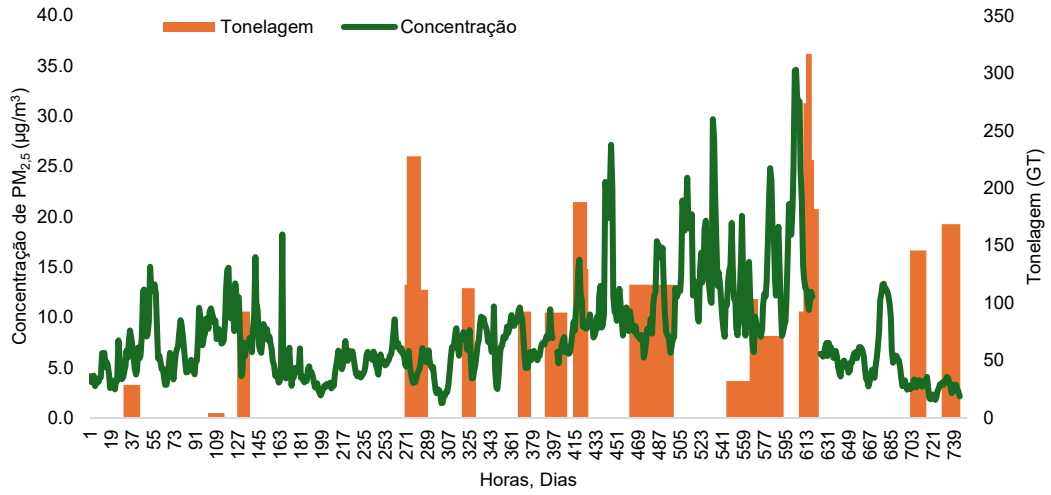


Anexo XXI – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de julho segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “Estação-Física”

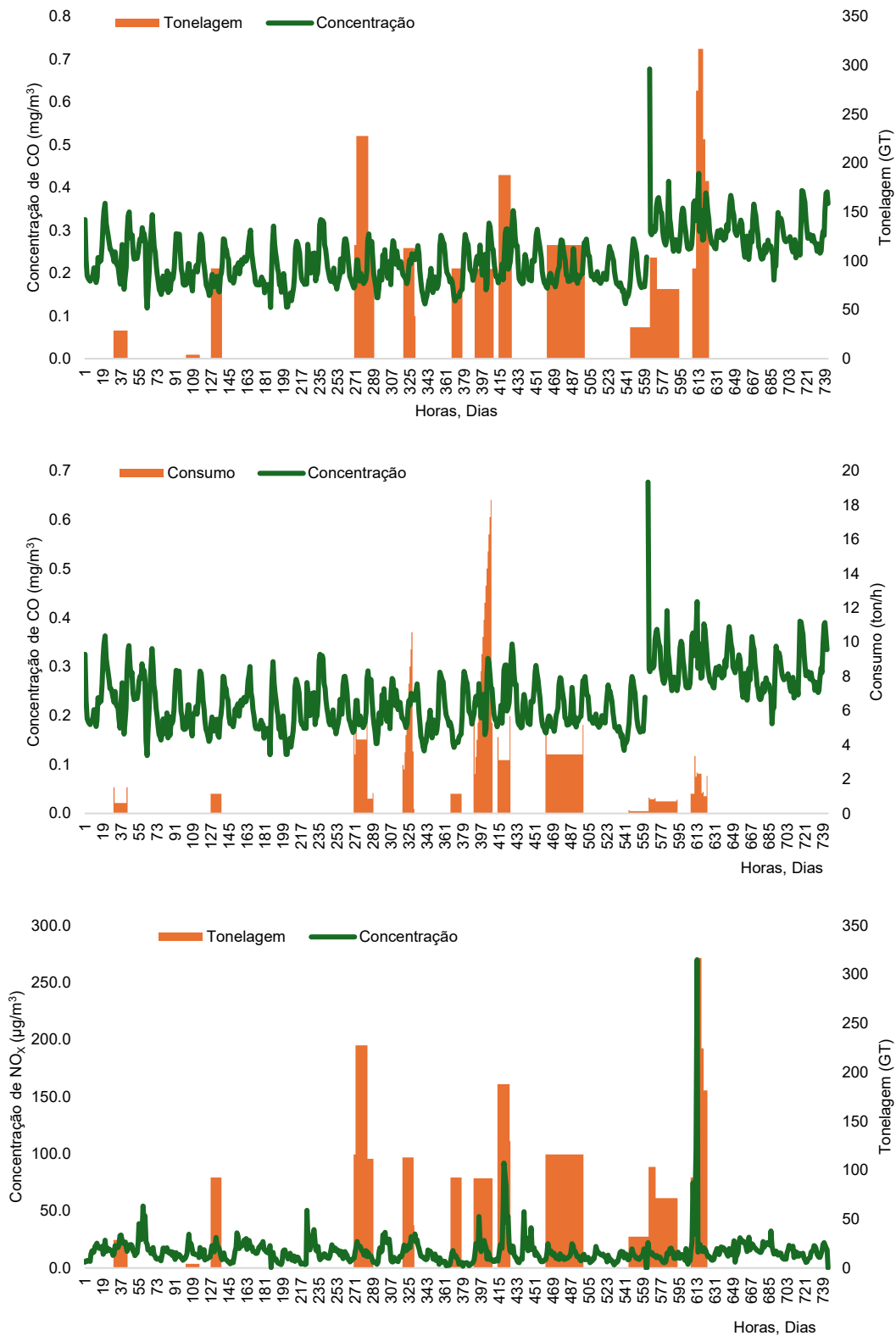


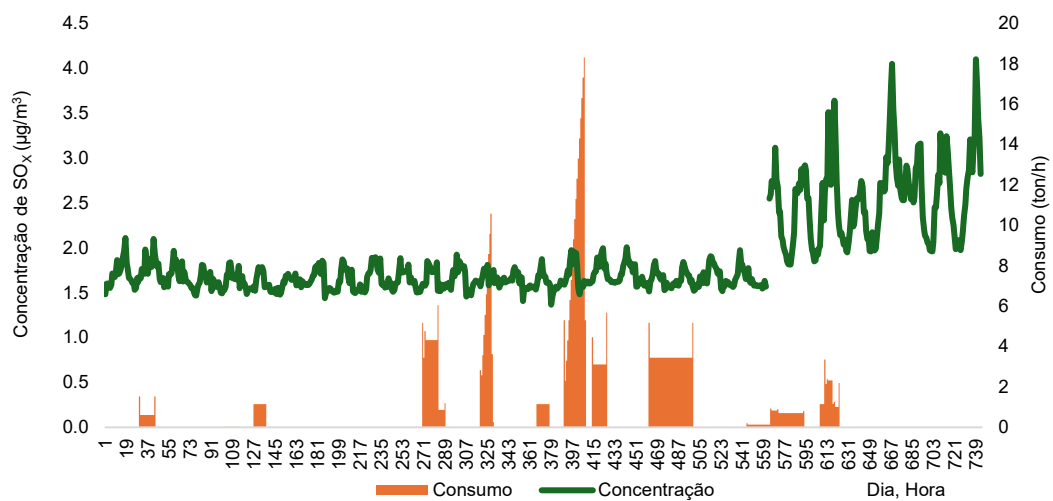
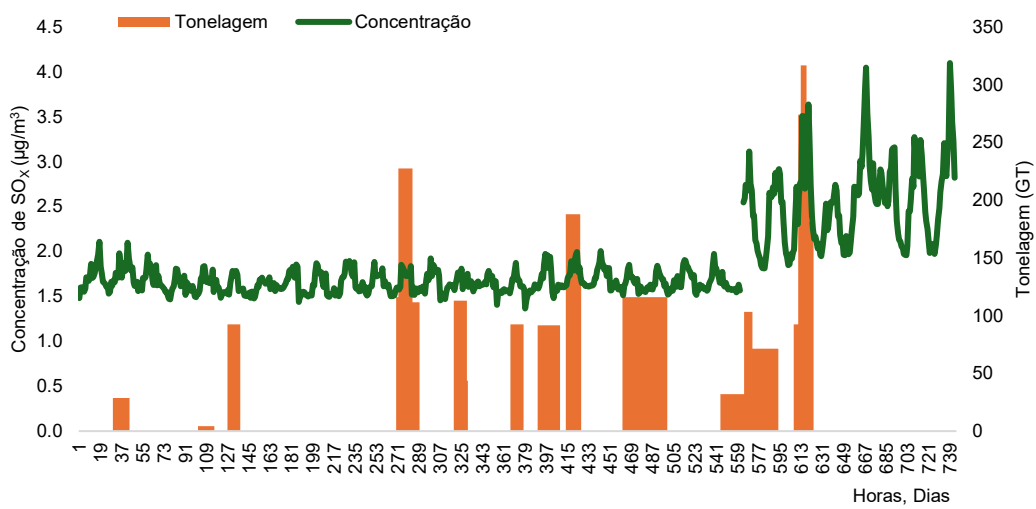
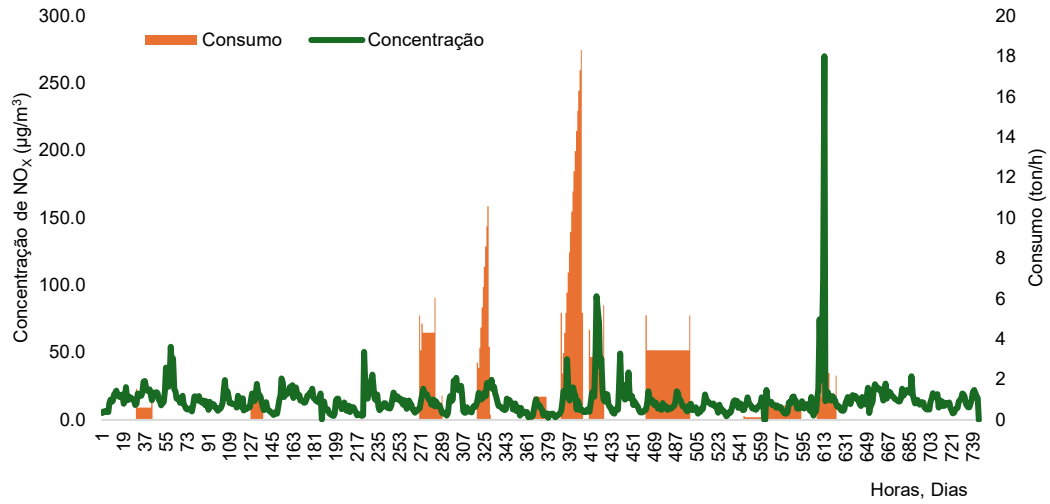


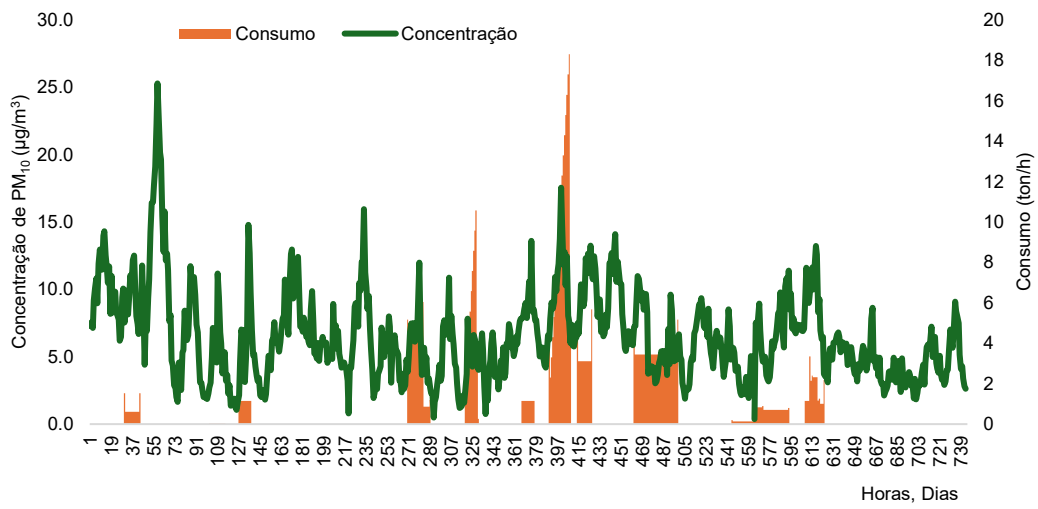
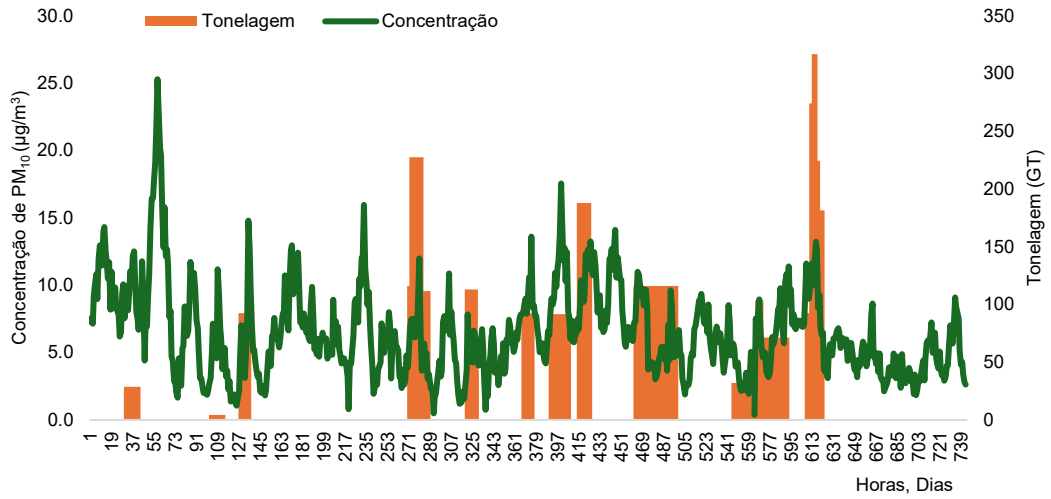


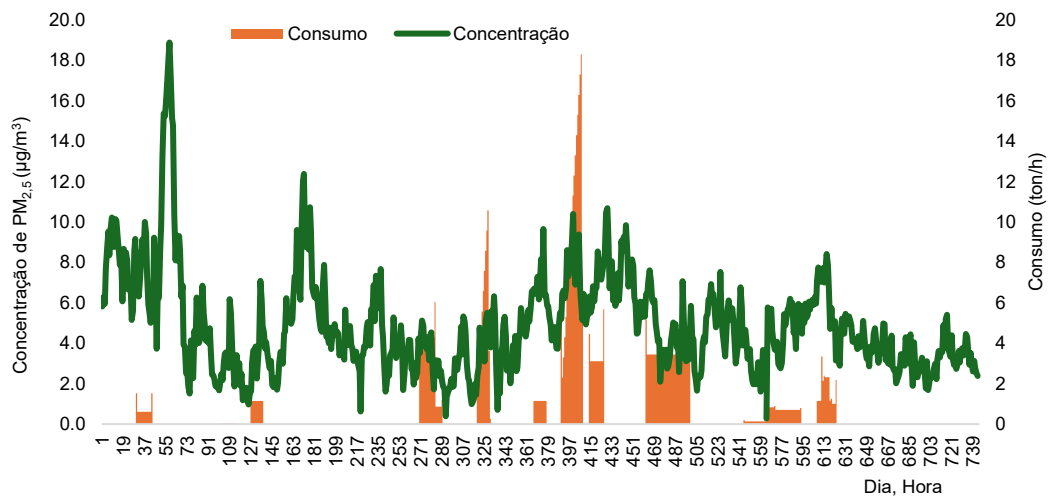
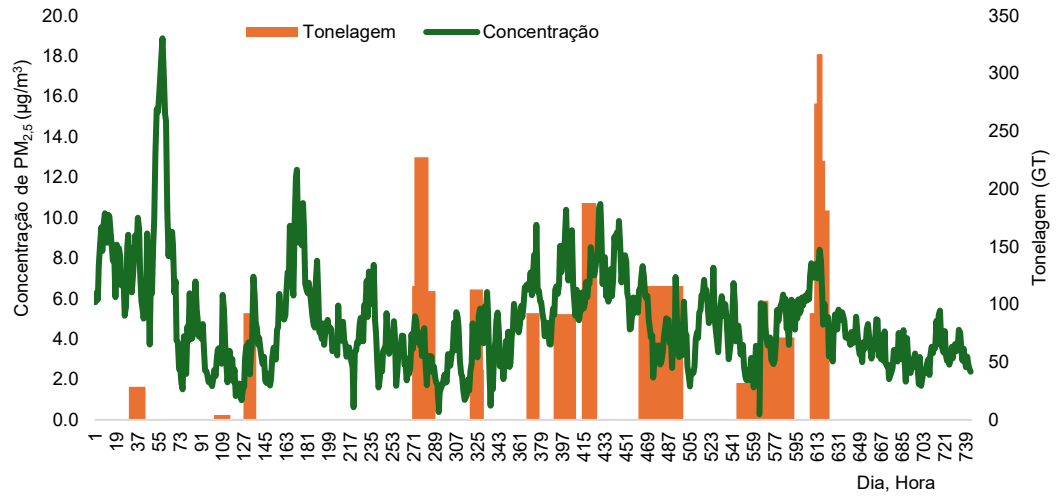


Anexo XXII – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de julho segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P1-Móvel”

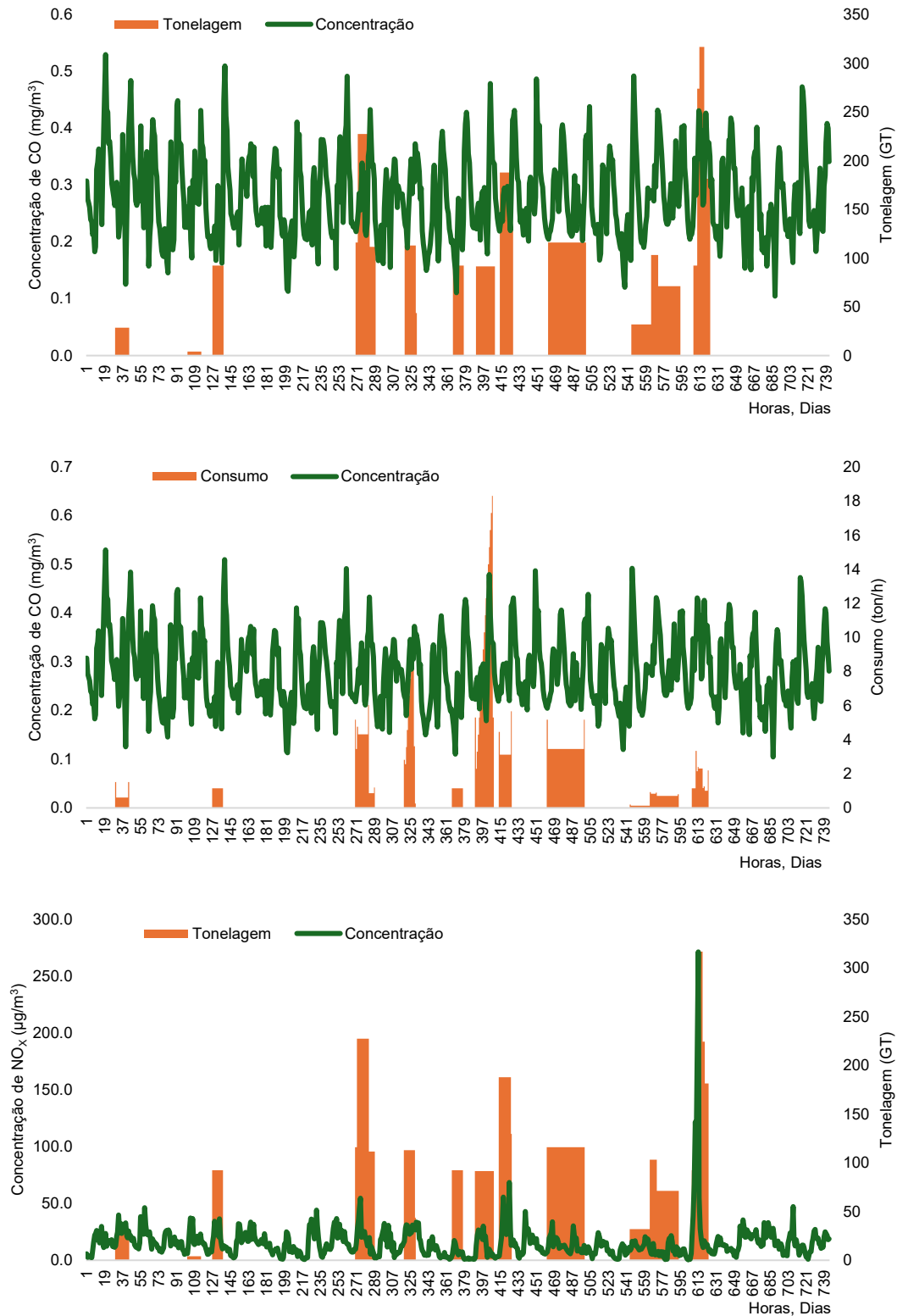


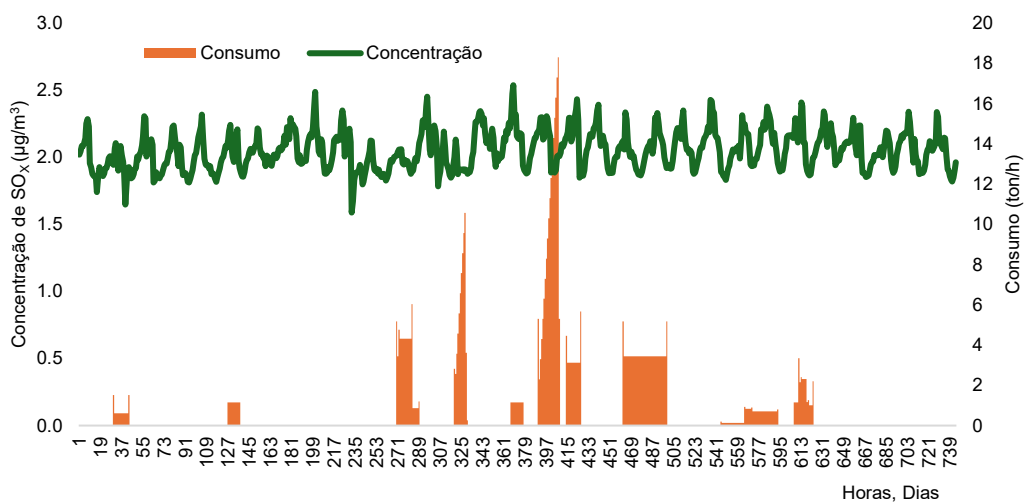
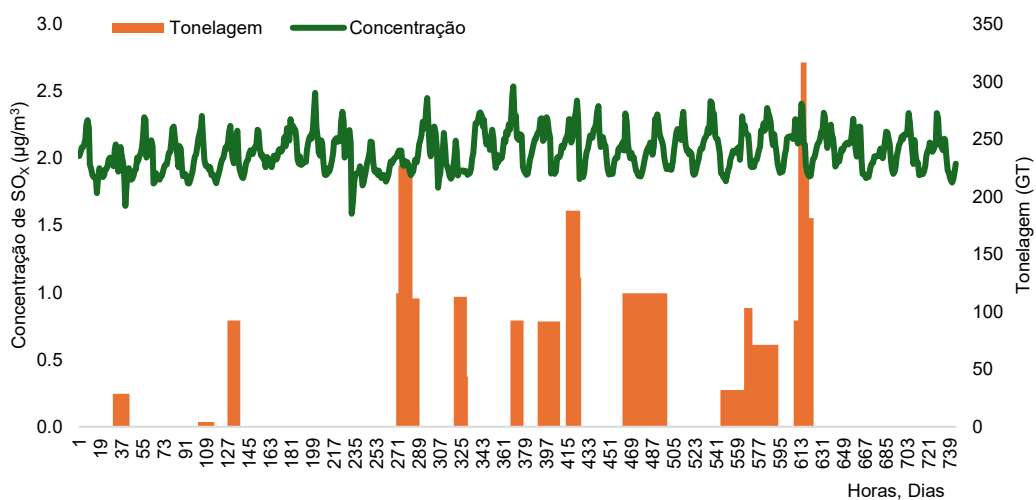
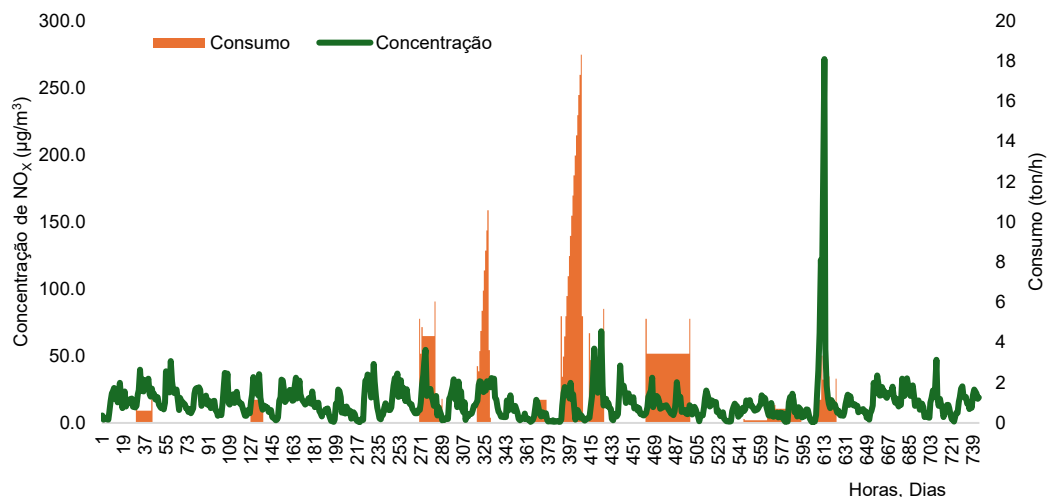


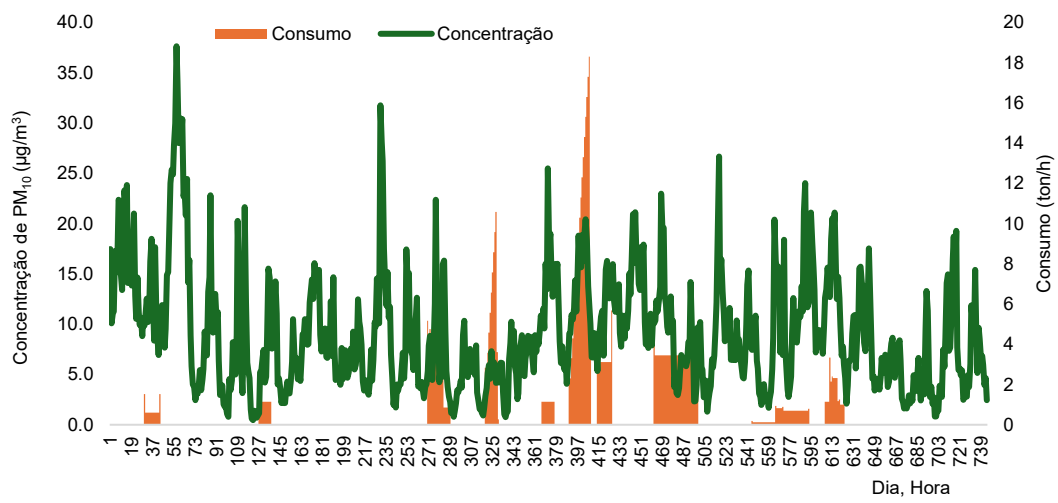
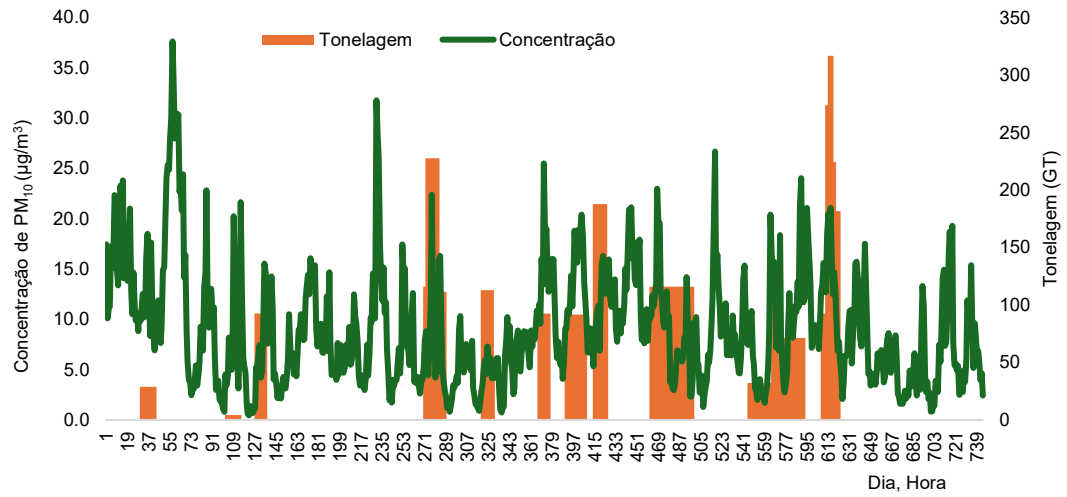


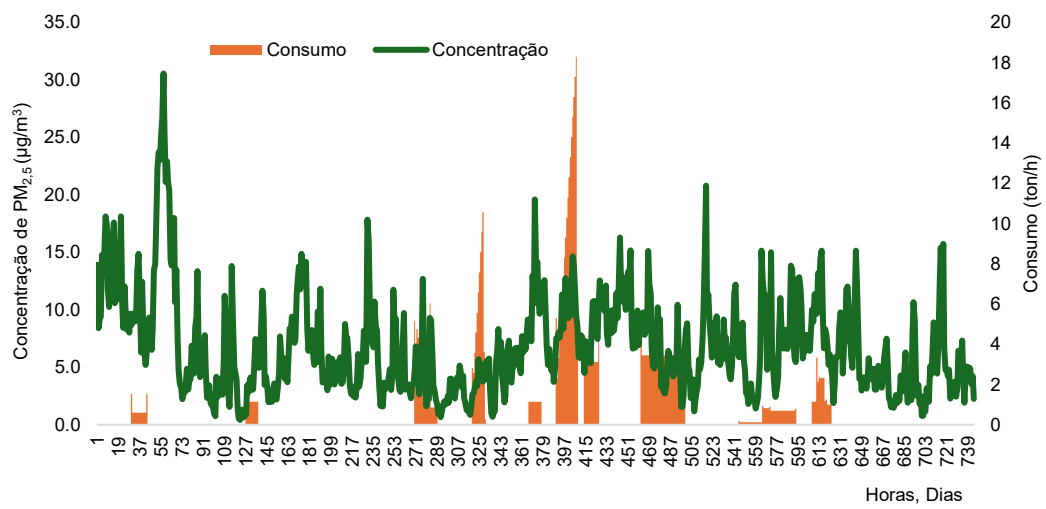
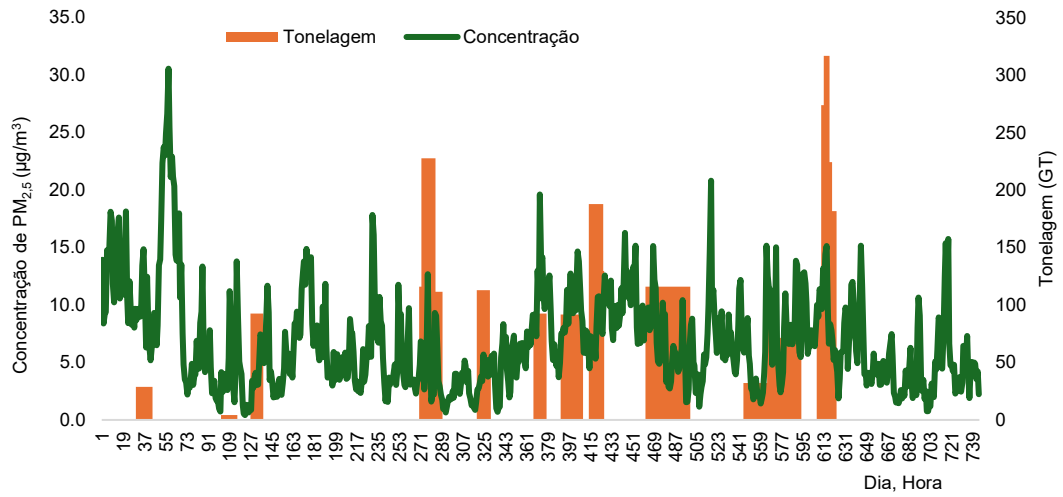


Anexo XXIII – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de julho segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P2-Móvel”

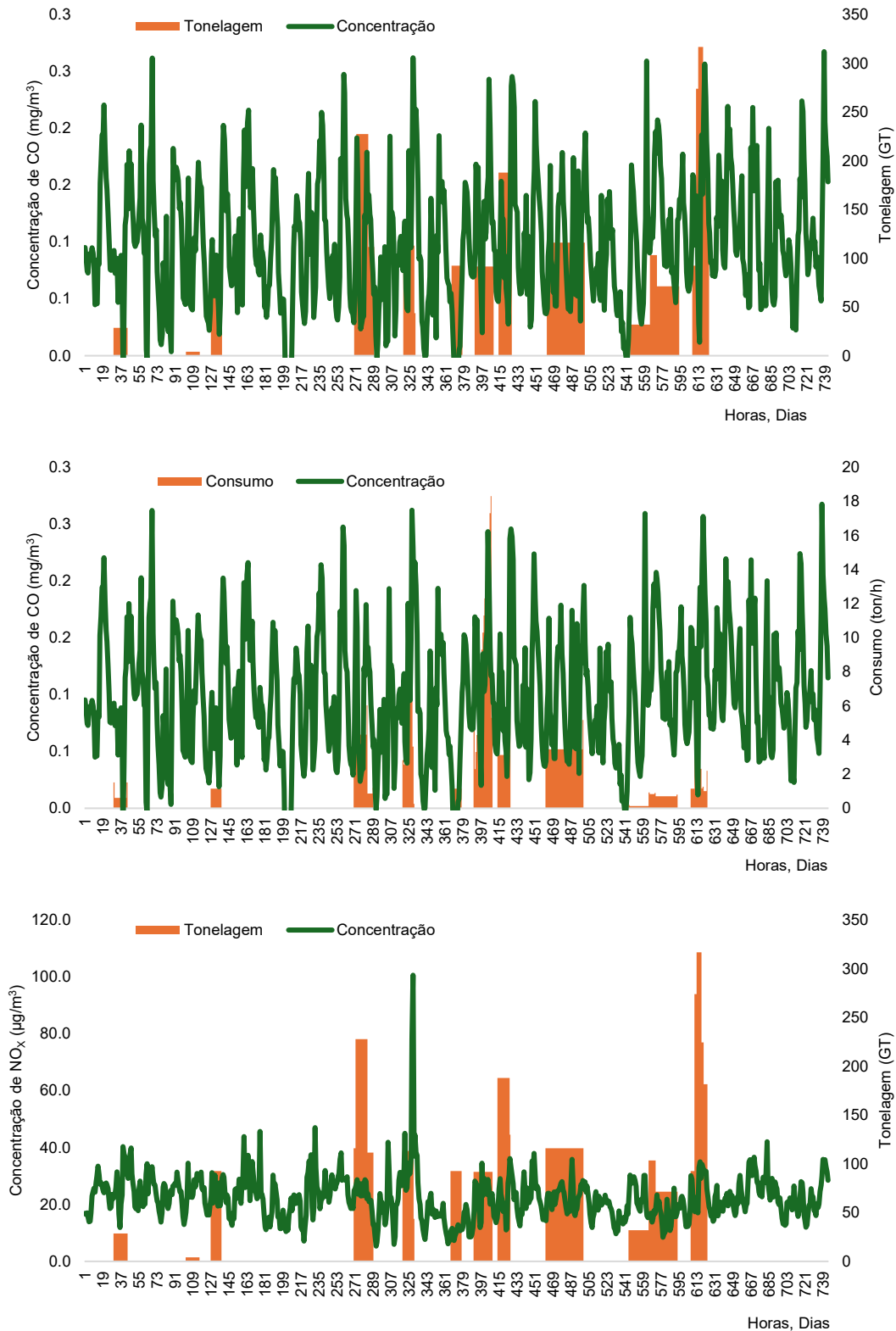


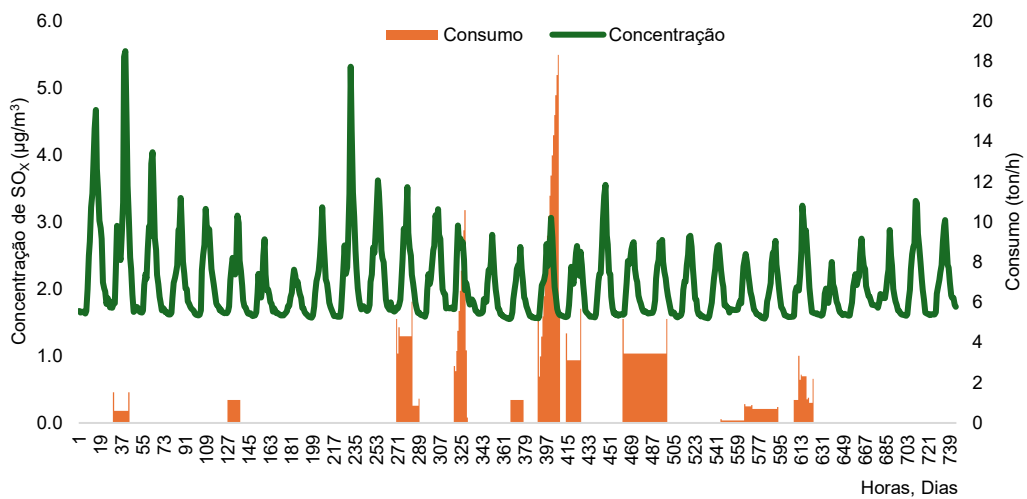
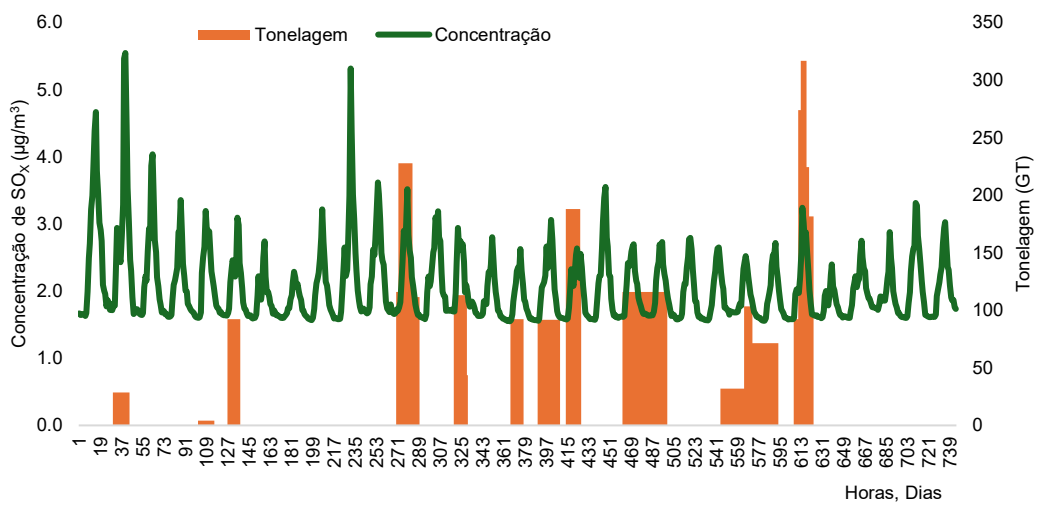
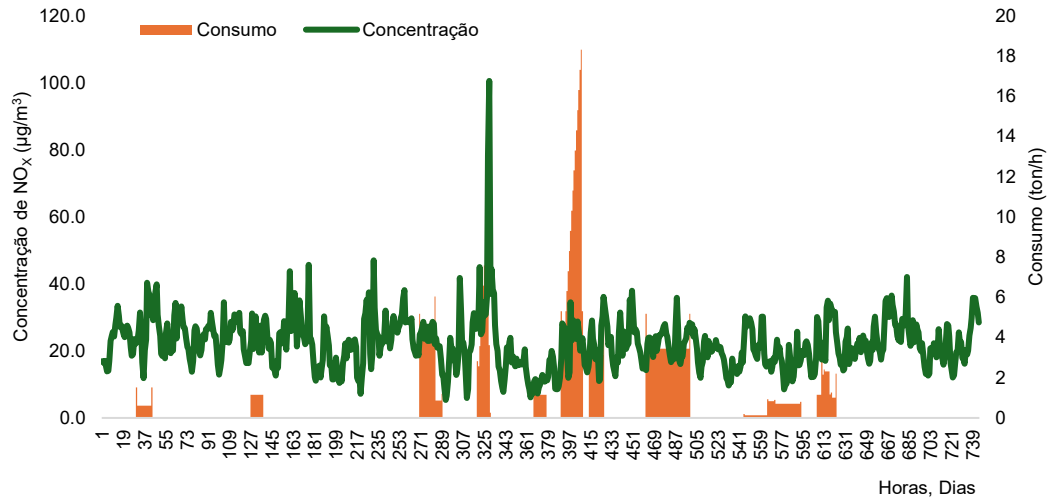


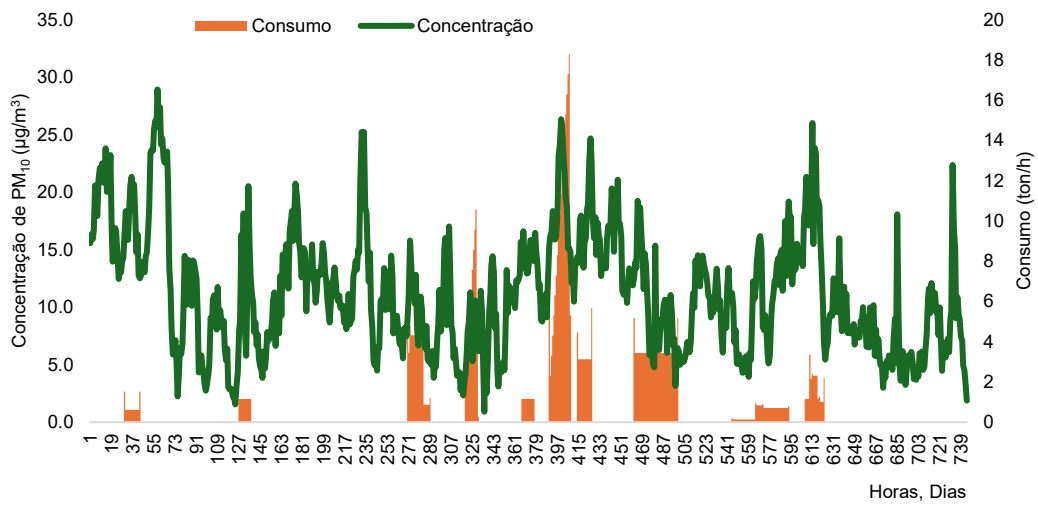
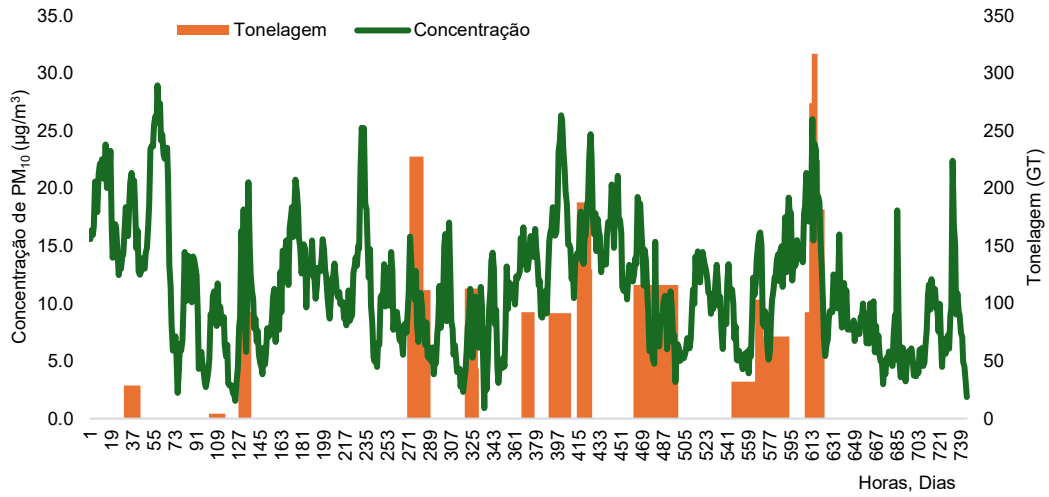


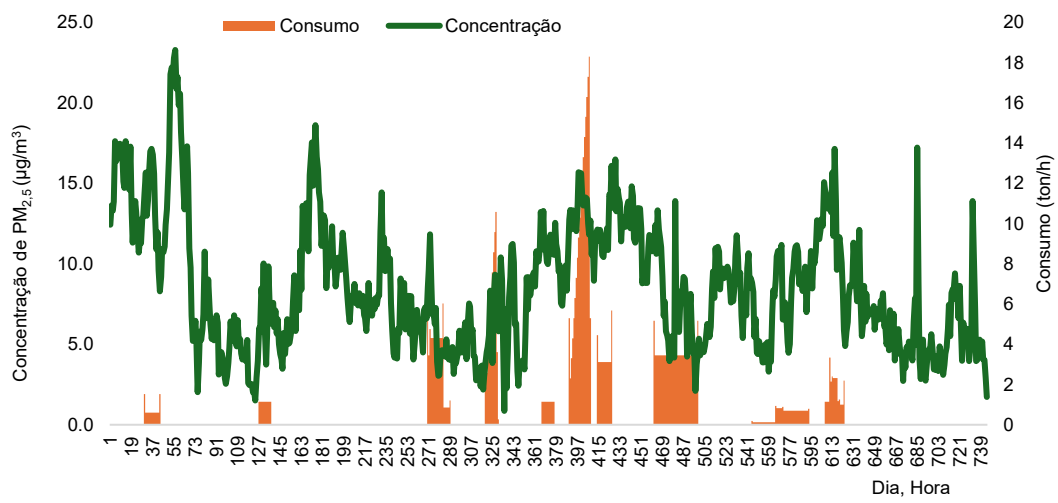
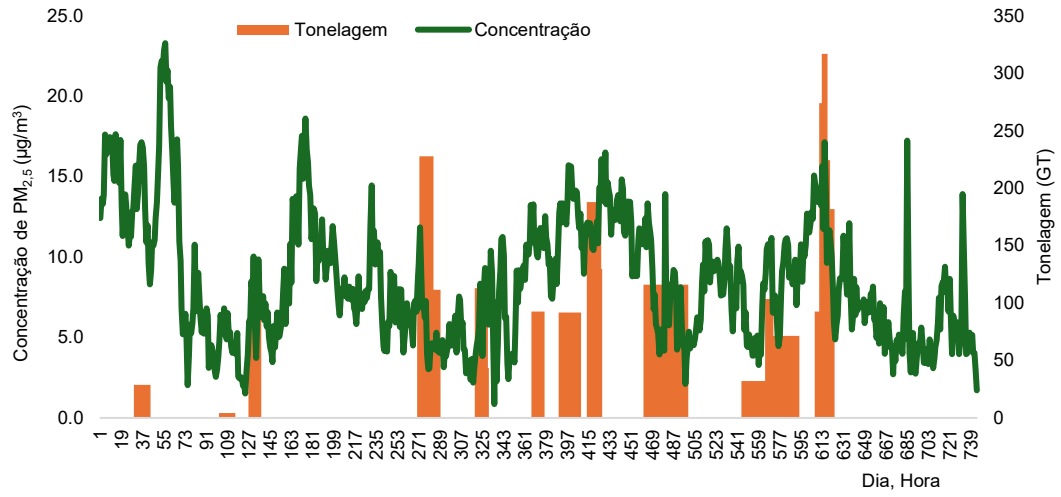


Anexo XXIV – Variação da concentração dos poluentes ao longo do mês de julho segundo o consumo e a tonelagem dos navios na “P3-Móvel”

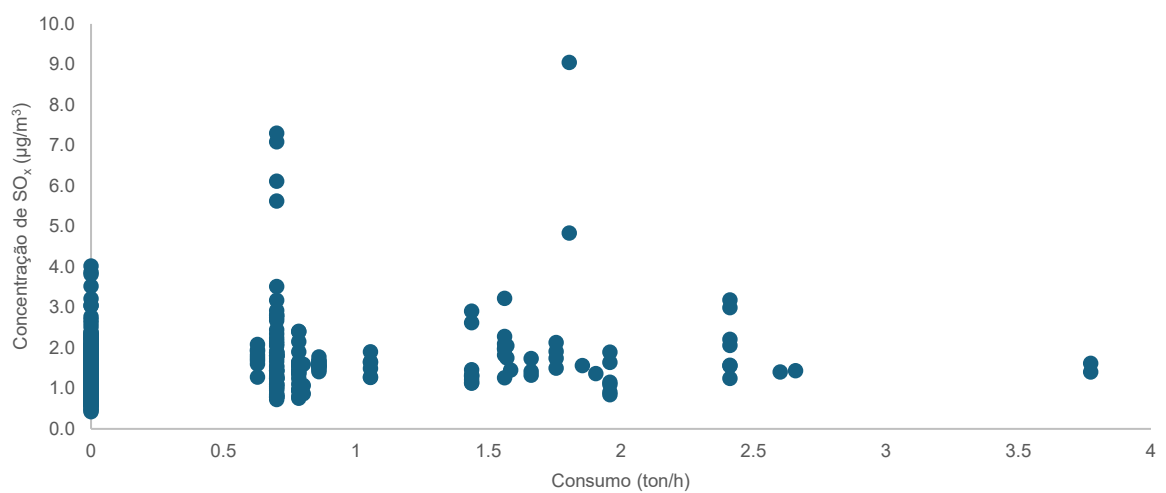
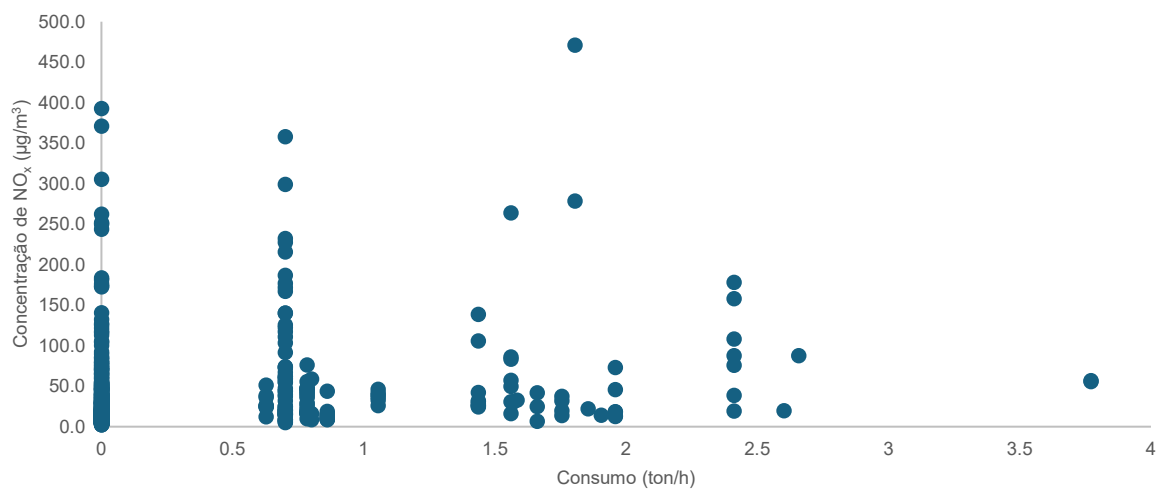
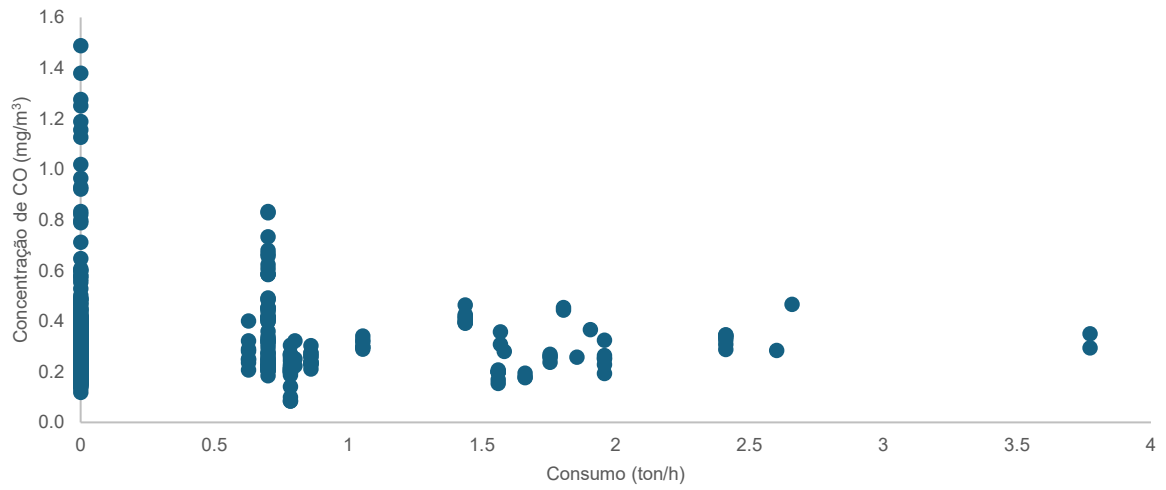




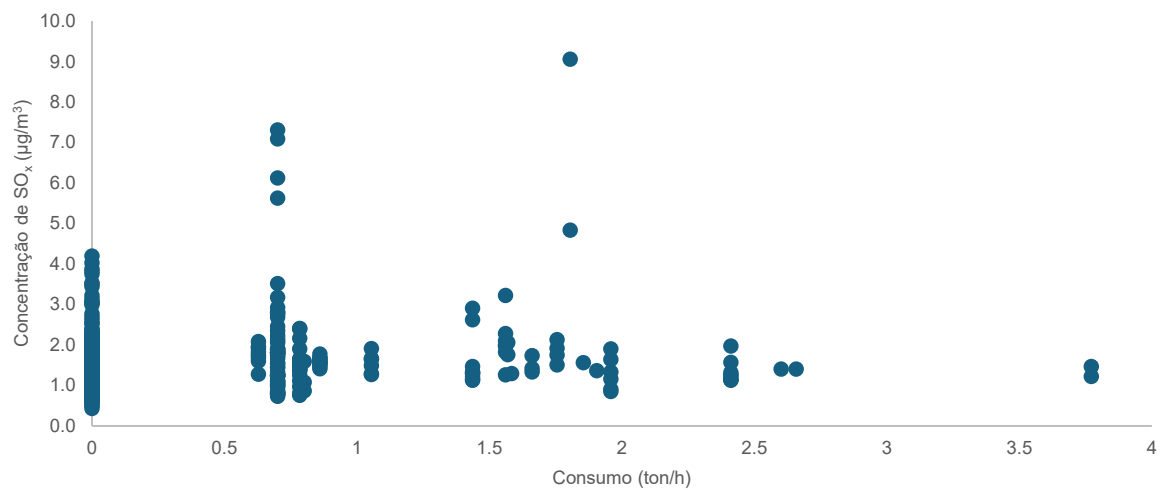
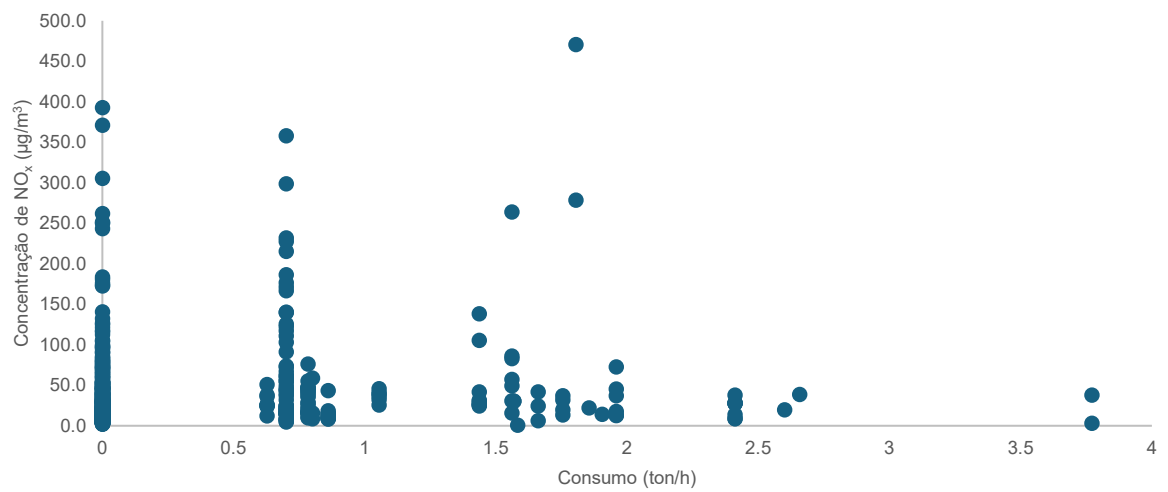
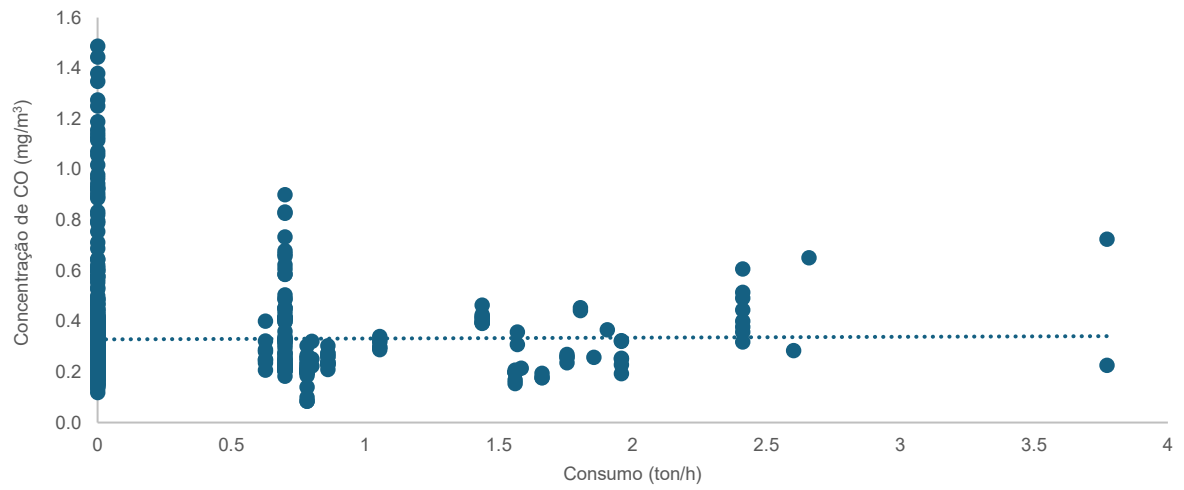


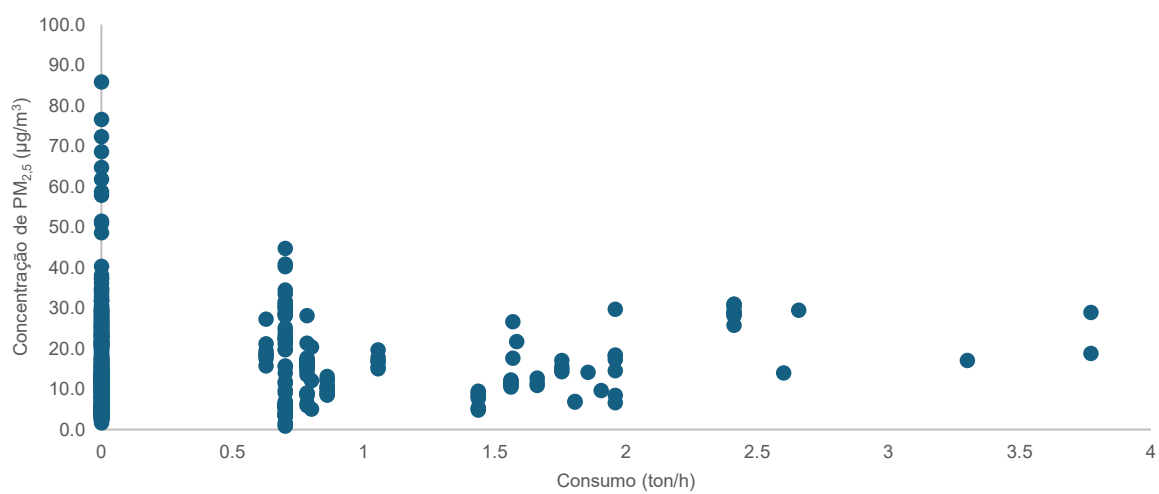
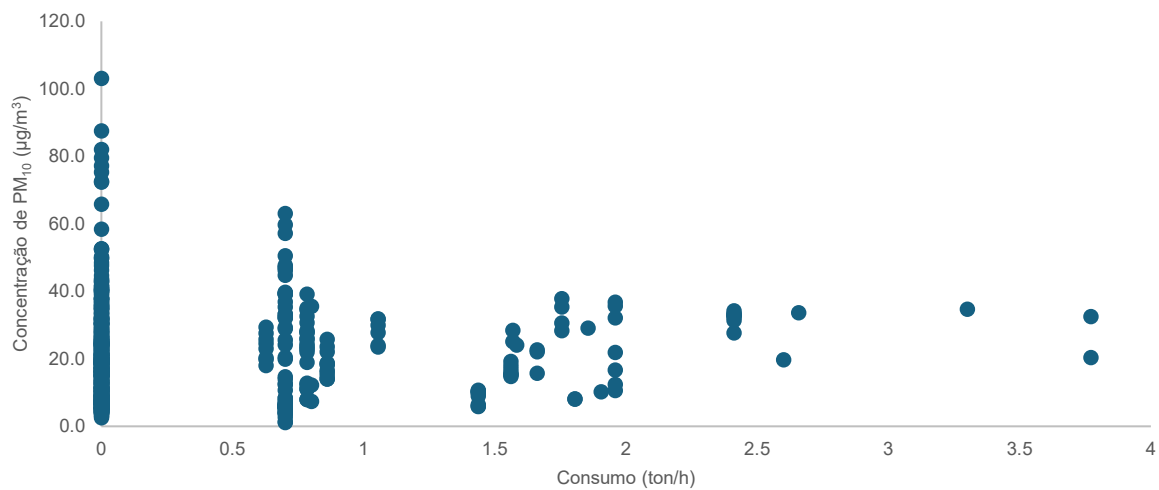


Anexo XXV – Dispersão no mês de fevereiro para o sensor “Estação Física”

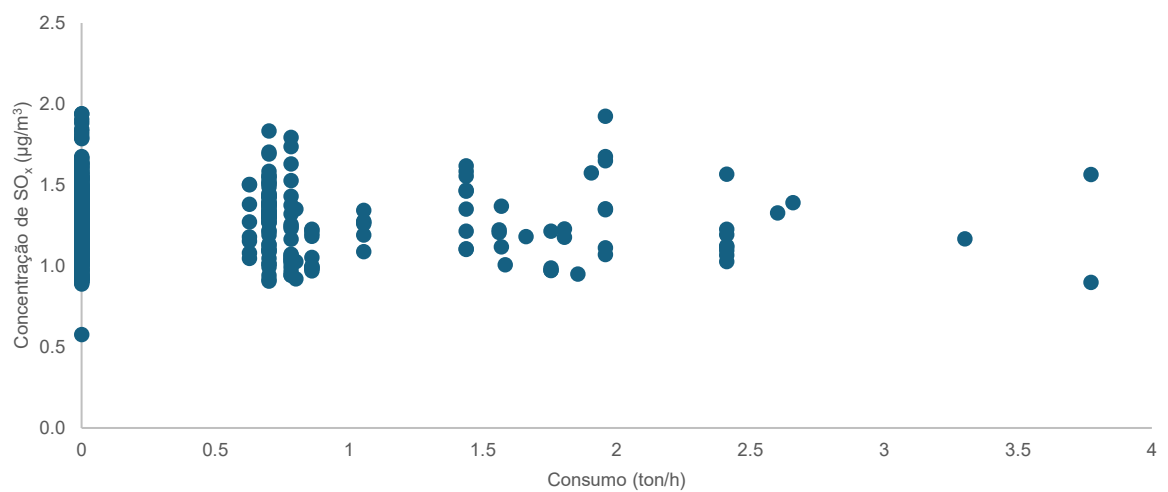
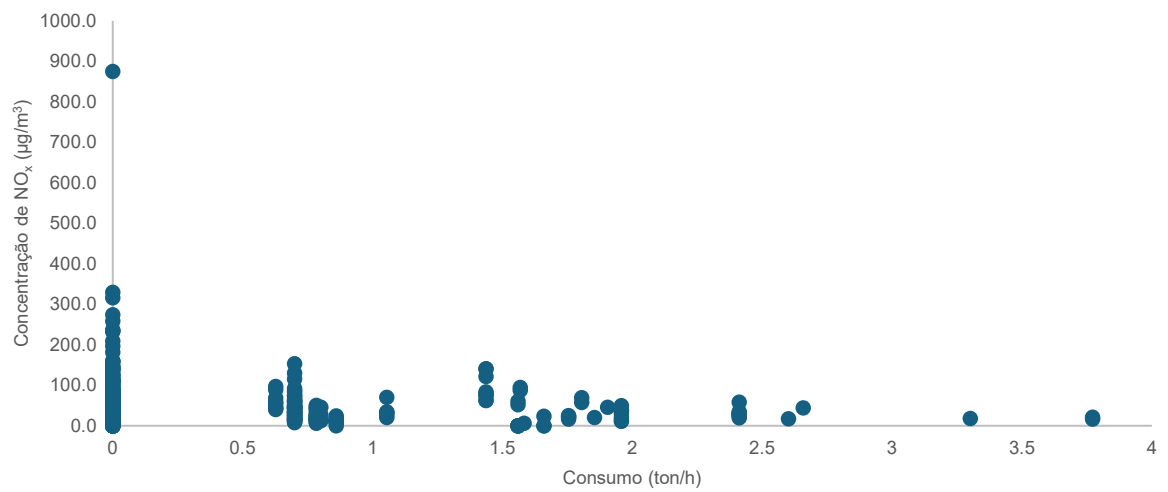
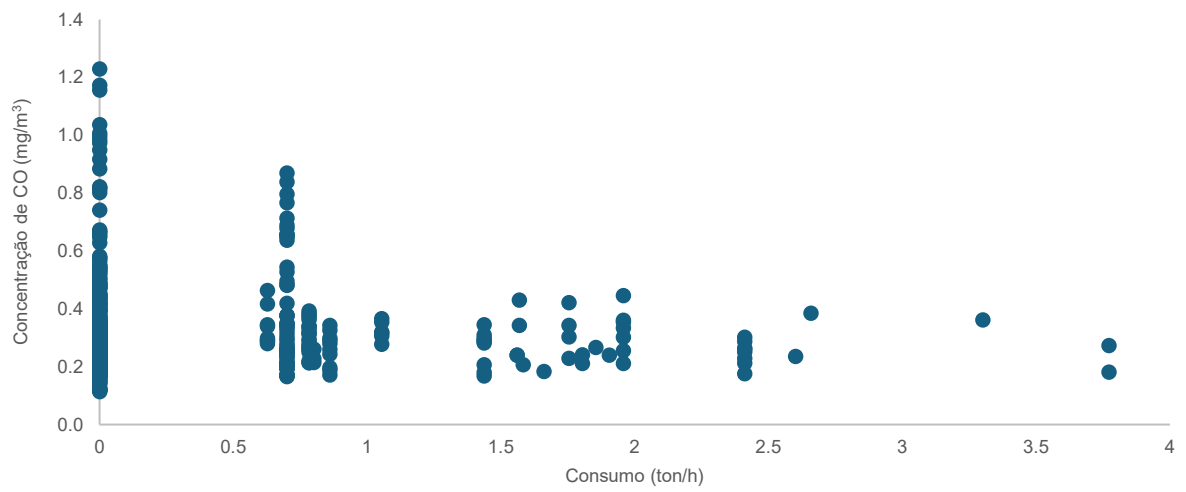


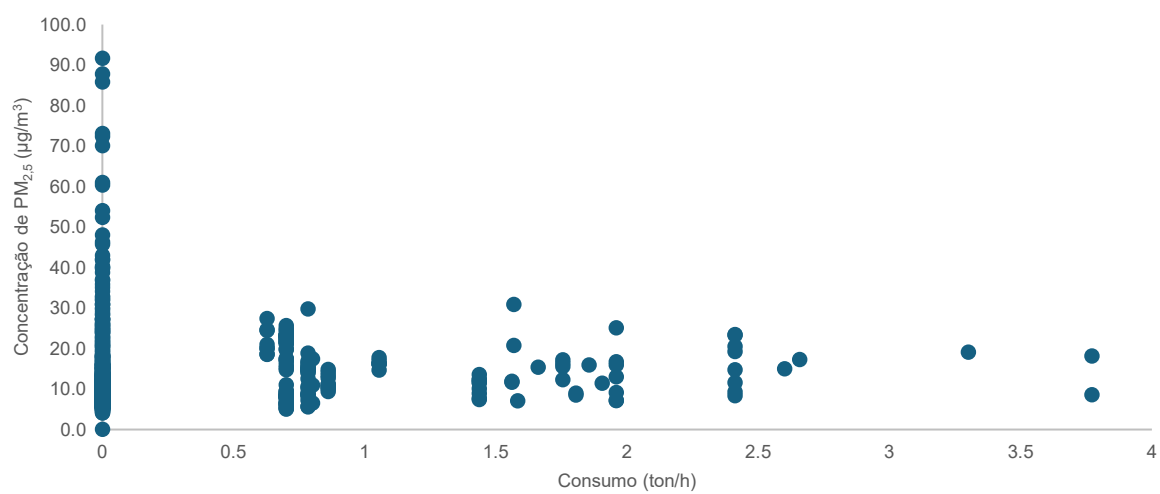
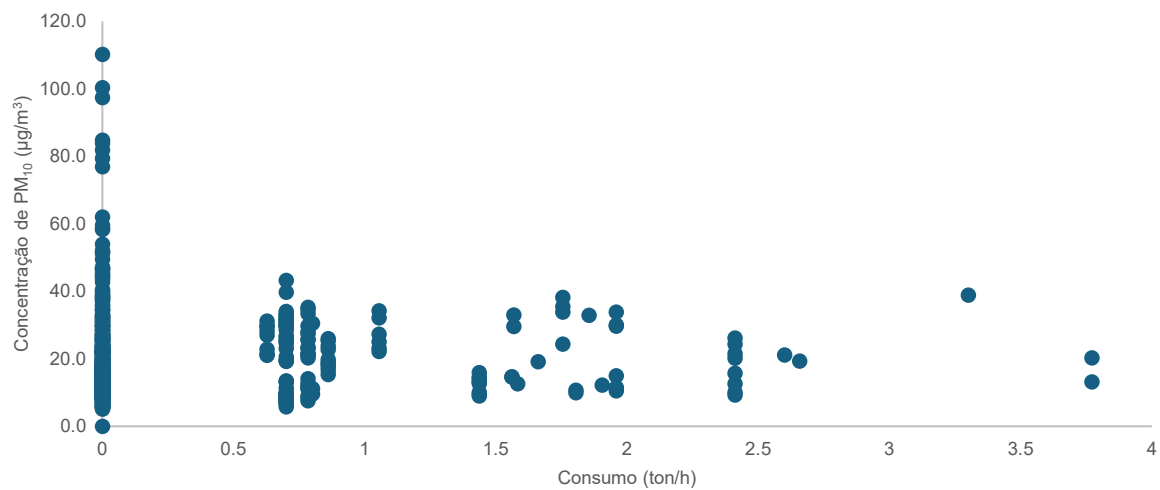
Anexo XXVI- Dispersão no mês de fevereiro para o sensor “P1-Móvel”



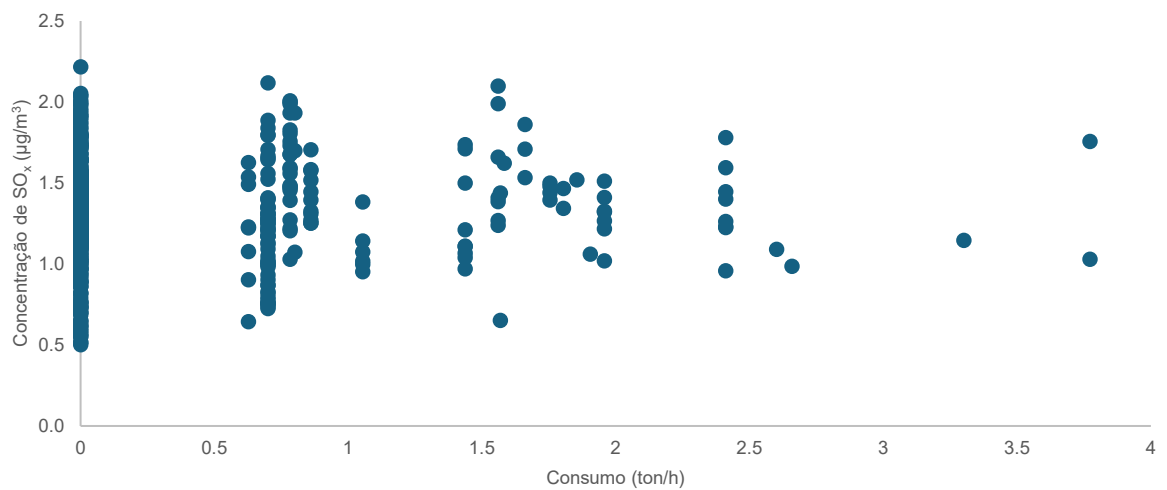
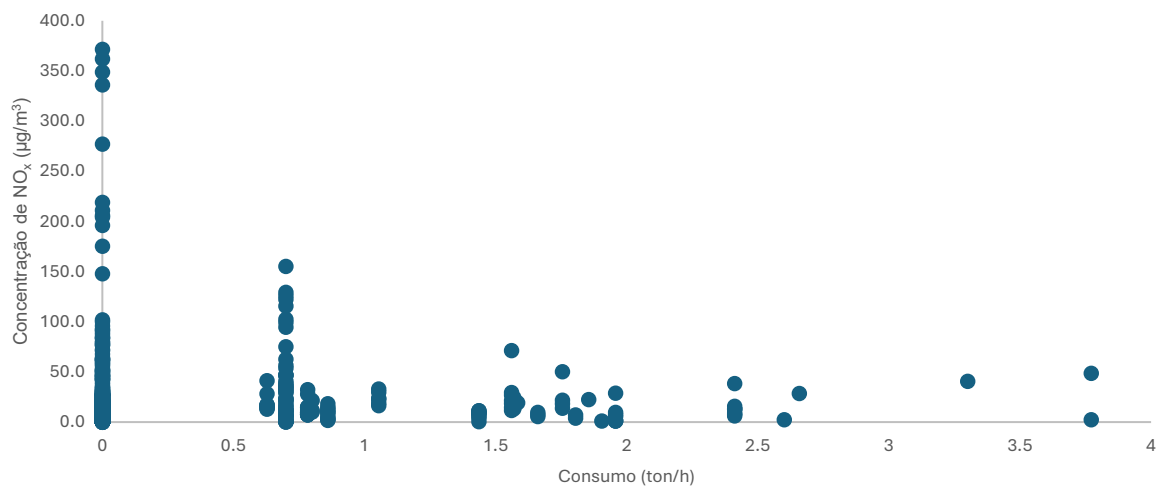
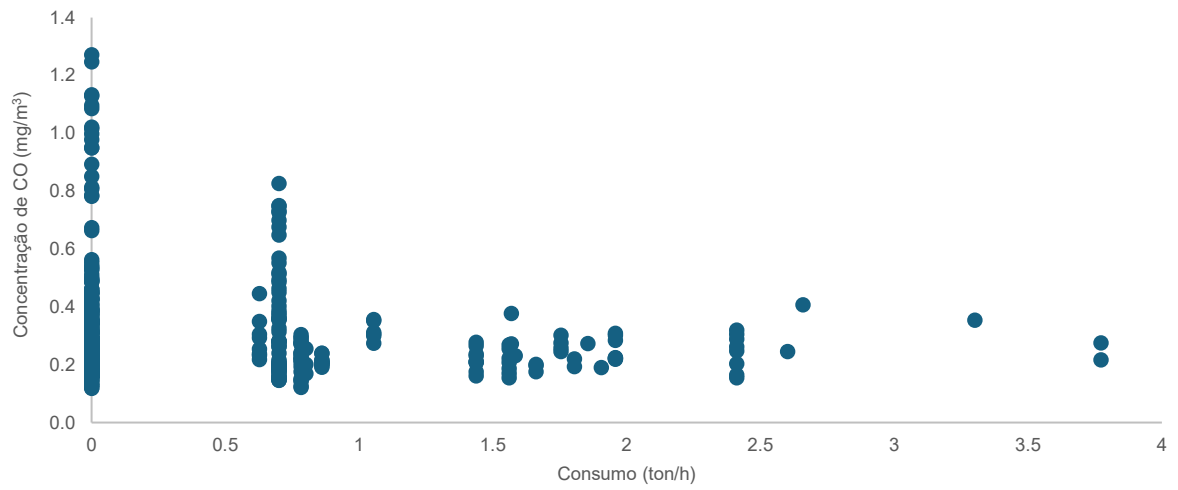


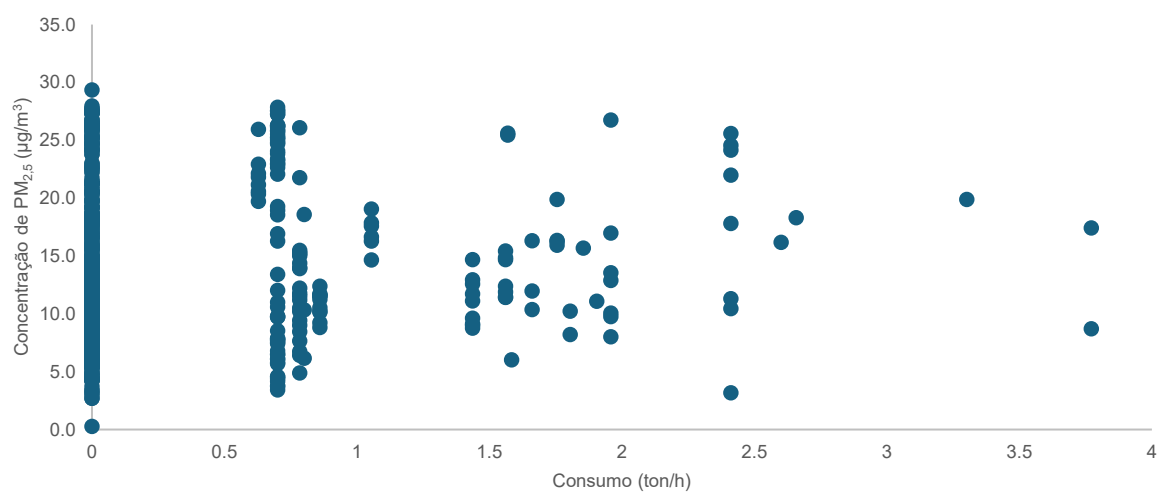
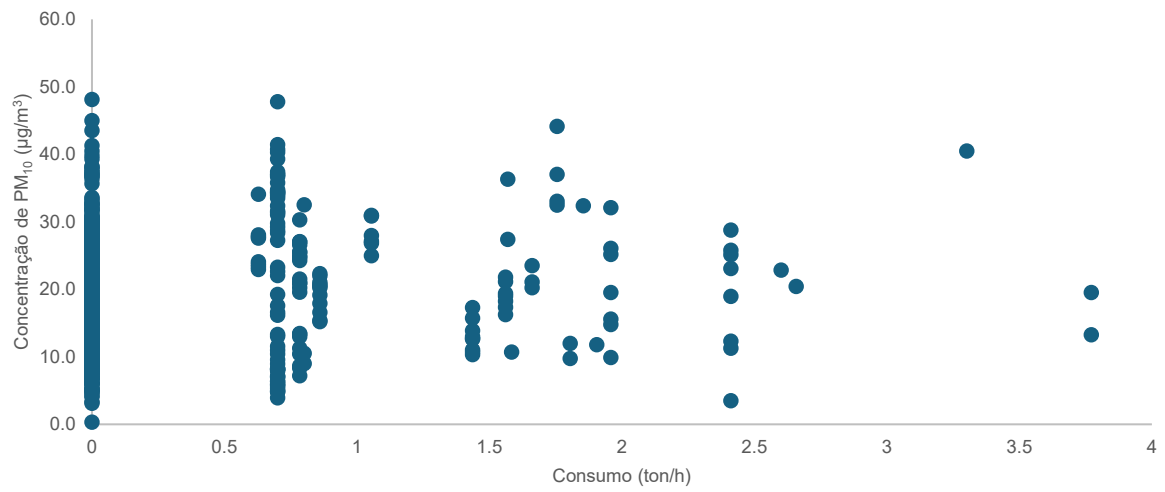
Anexo XXVII- Dispersão no mês de fevereiro para o sensor “P2-Móvel”



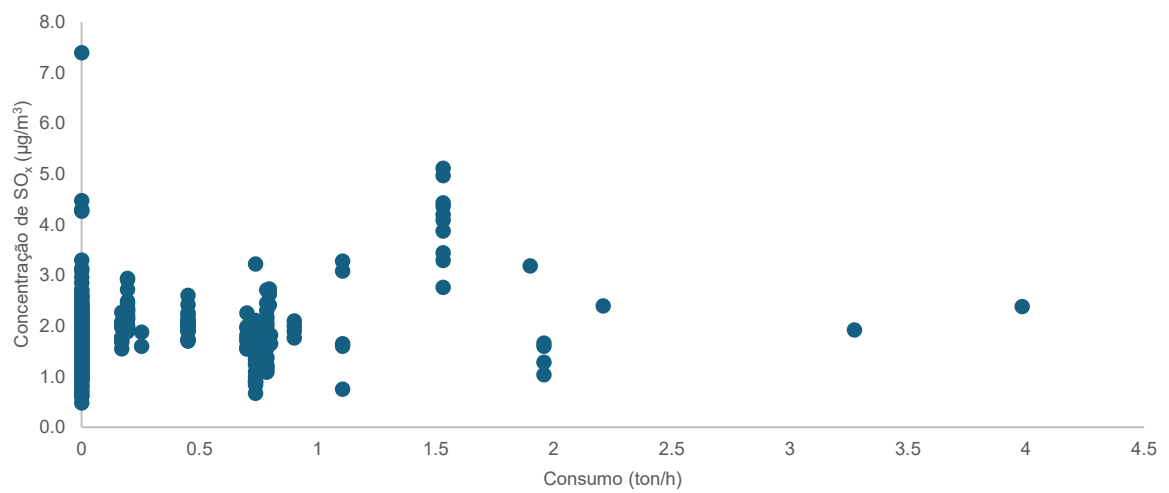
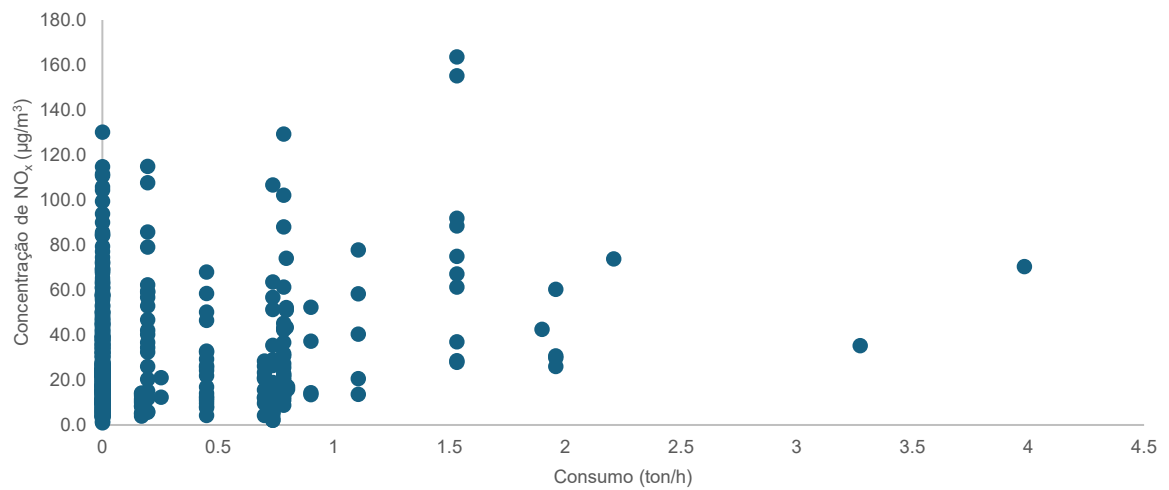
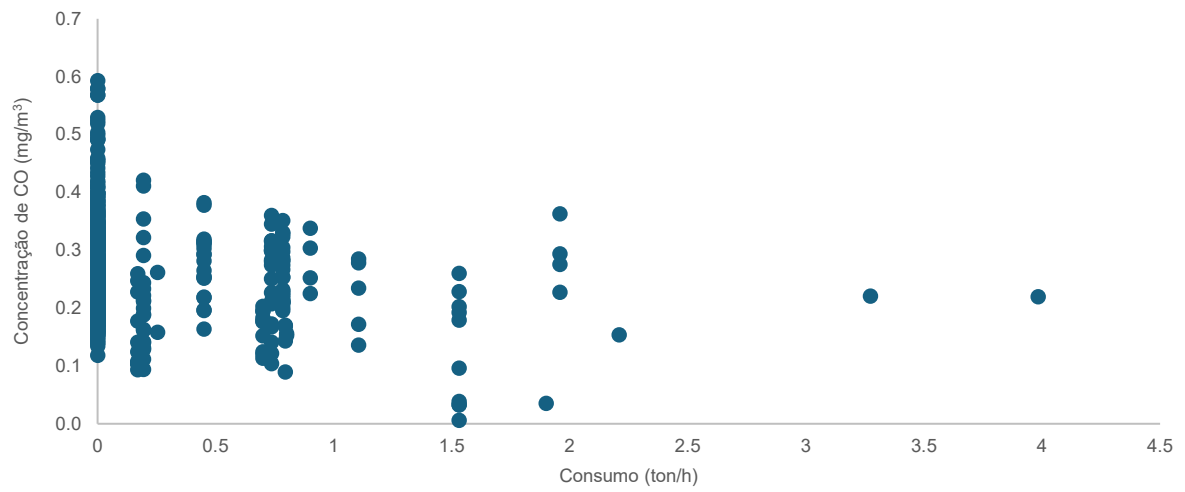


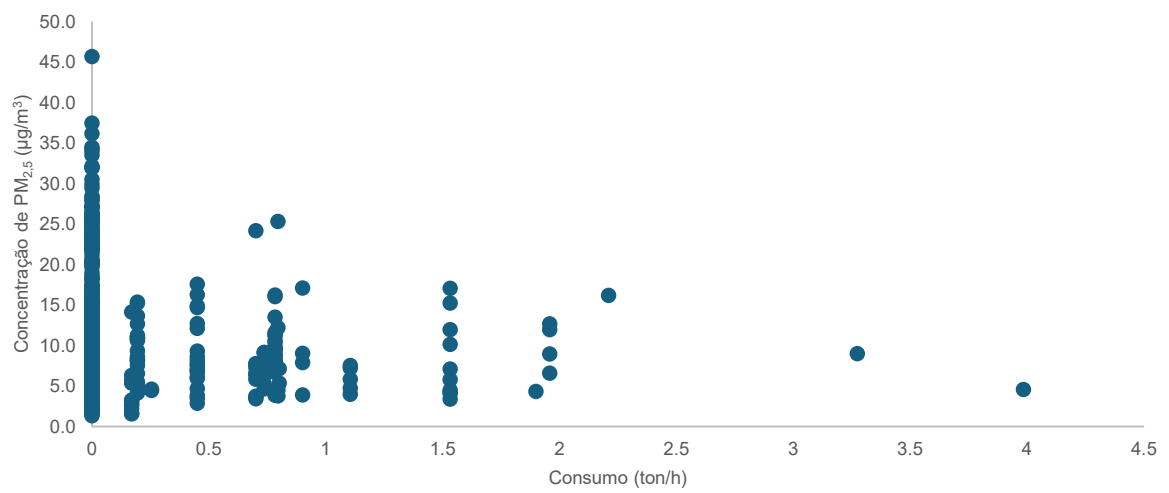
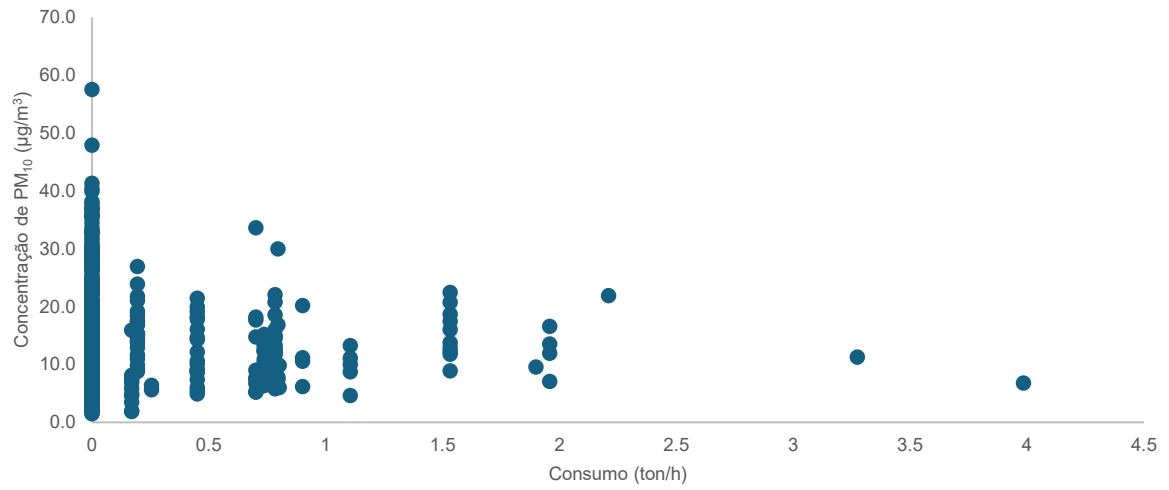
Anexo XXVIII- Dispersão no mês de fevereiro para o sensor “P3-Móvel”



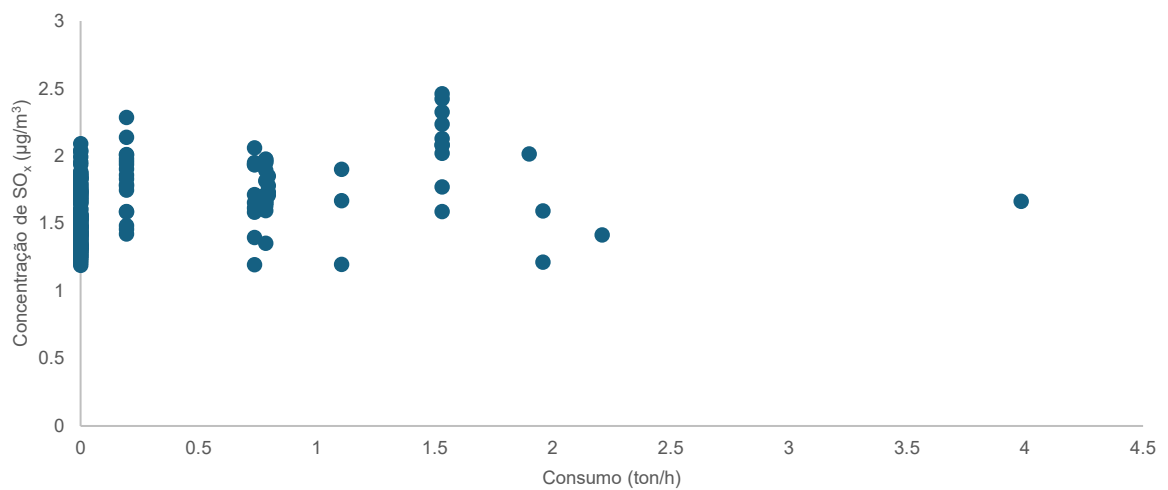
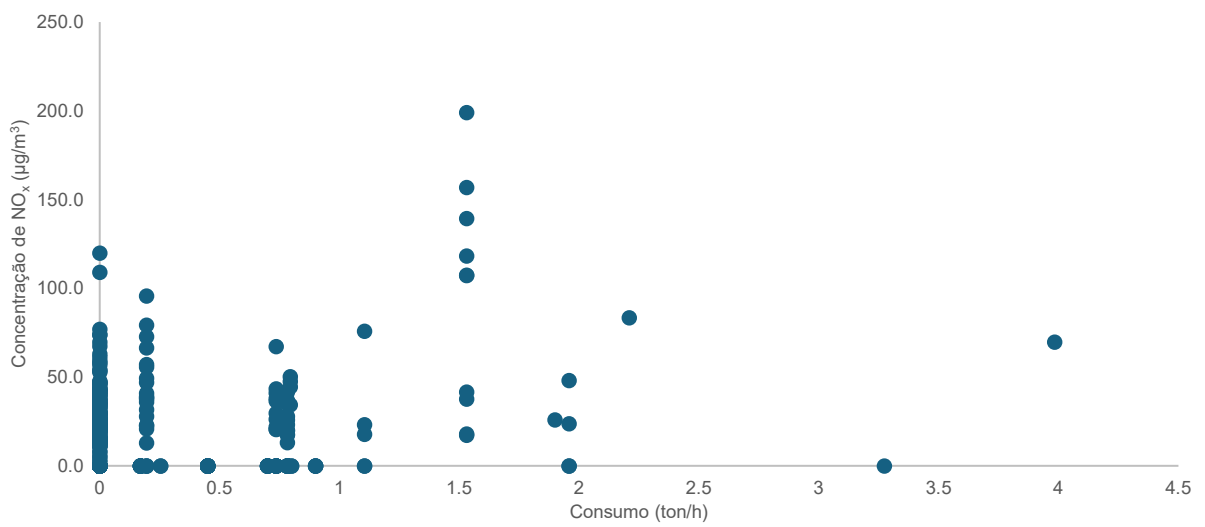
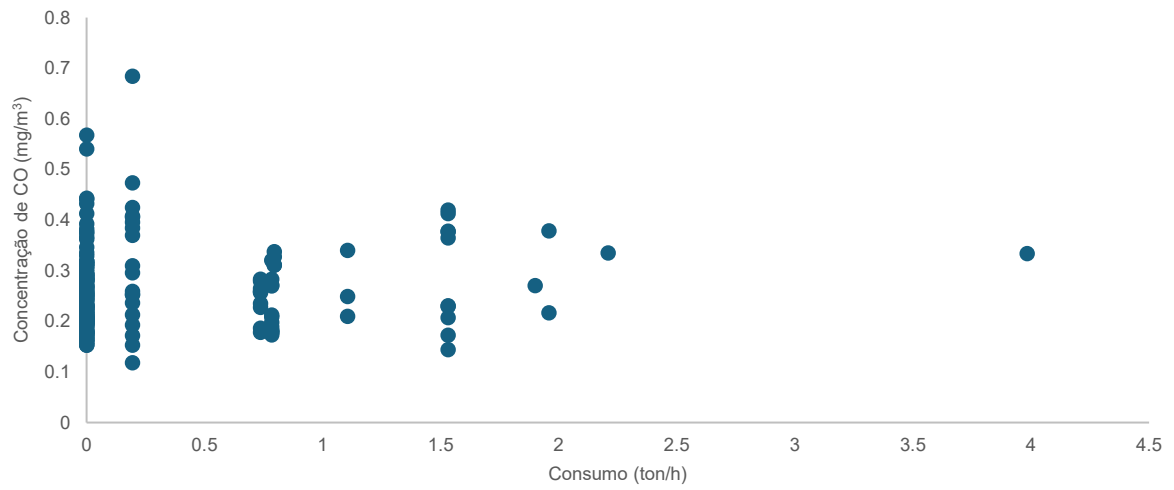


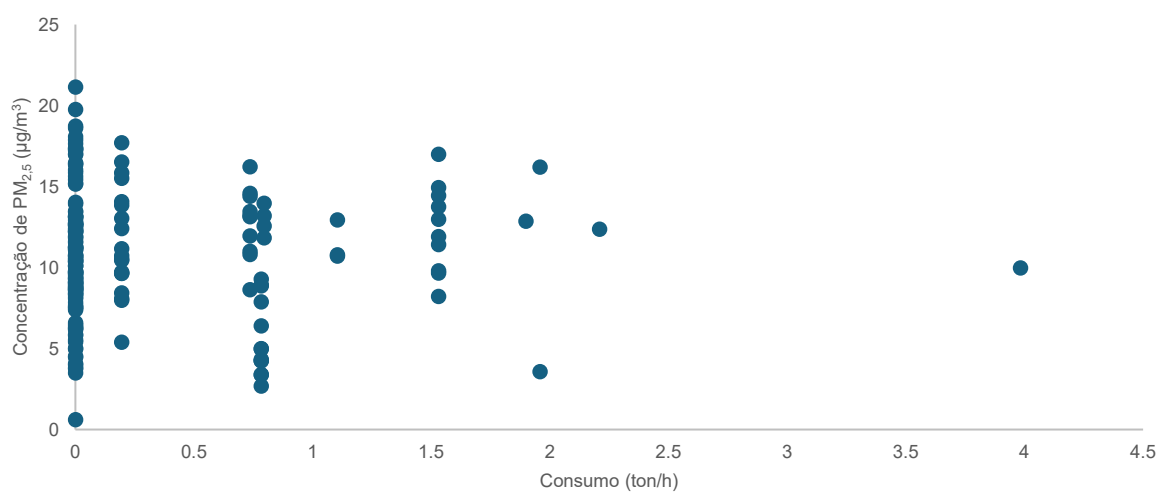
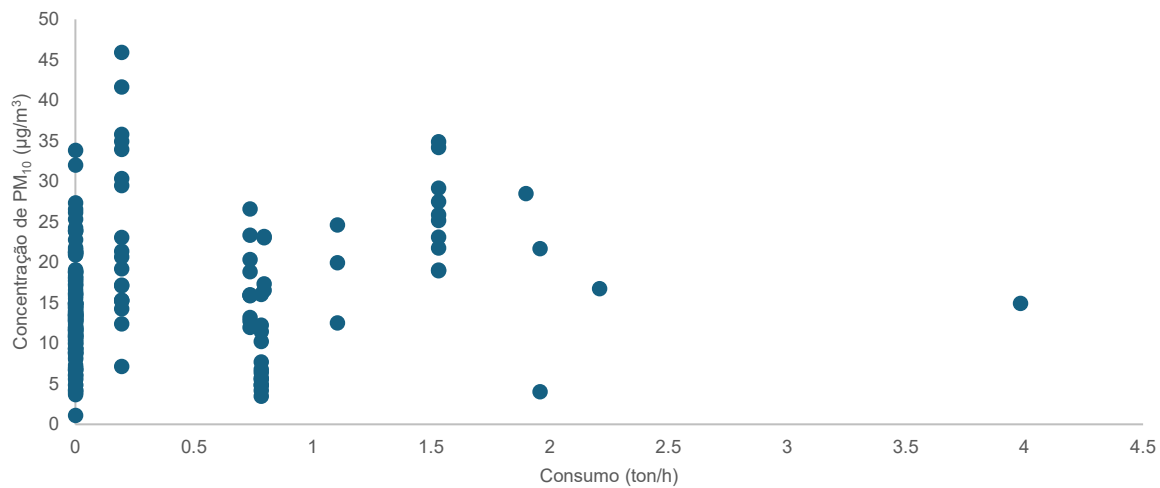
Anexo XXIX – Dispersão no mês de março para o sensor “Estação Física”



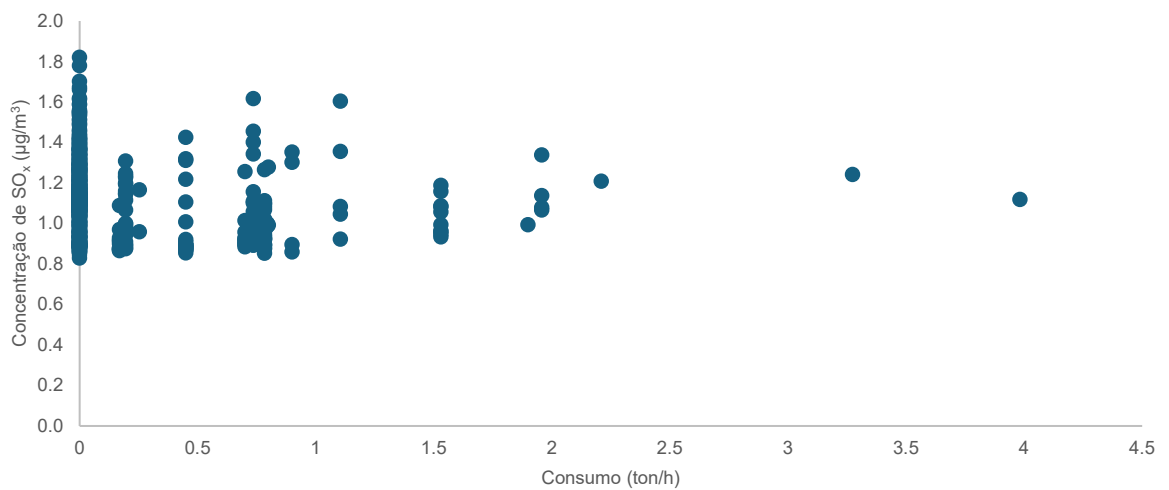
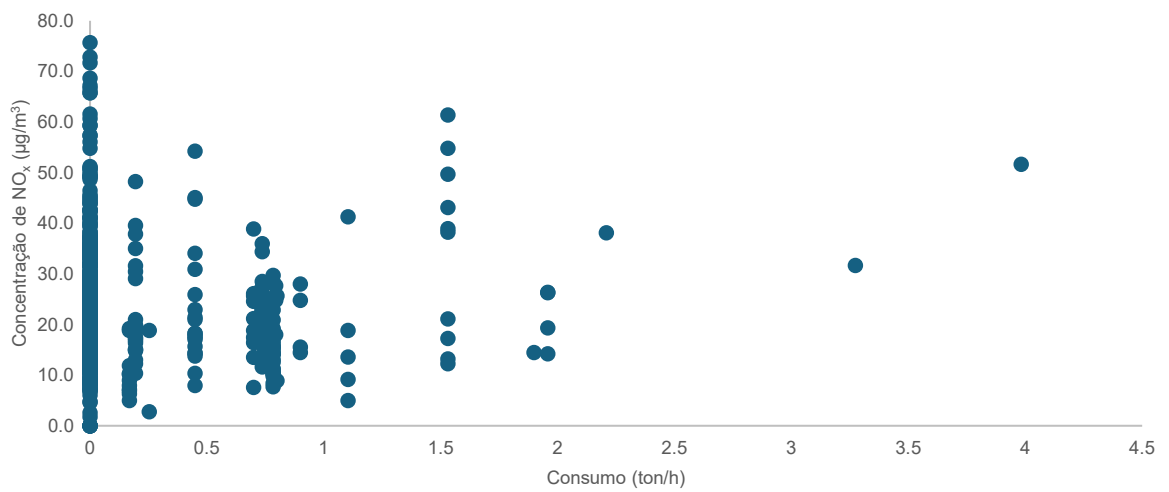
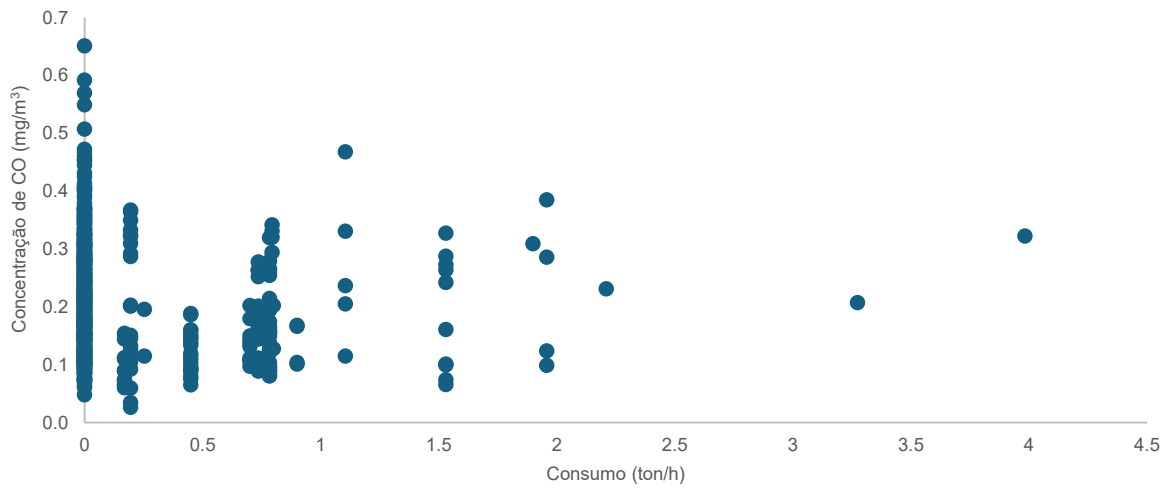


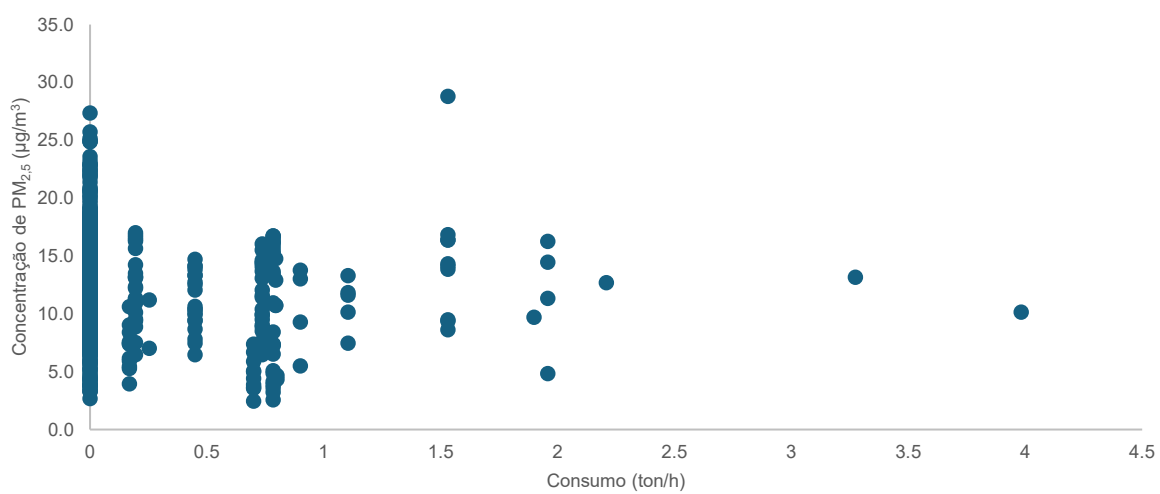
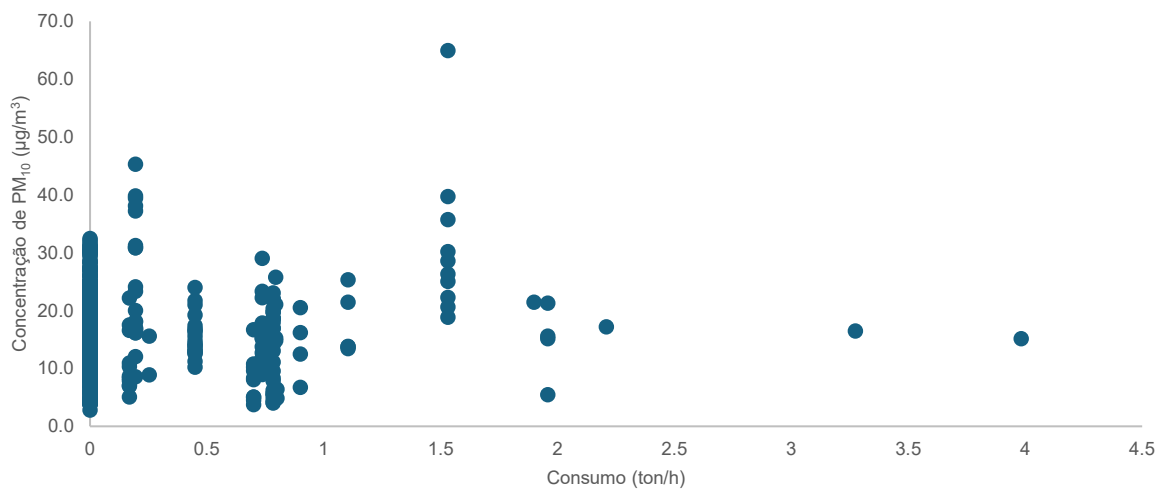
Anexo XXX – Dispersão no mês de março para o sensor “P1-Móvel”



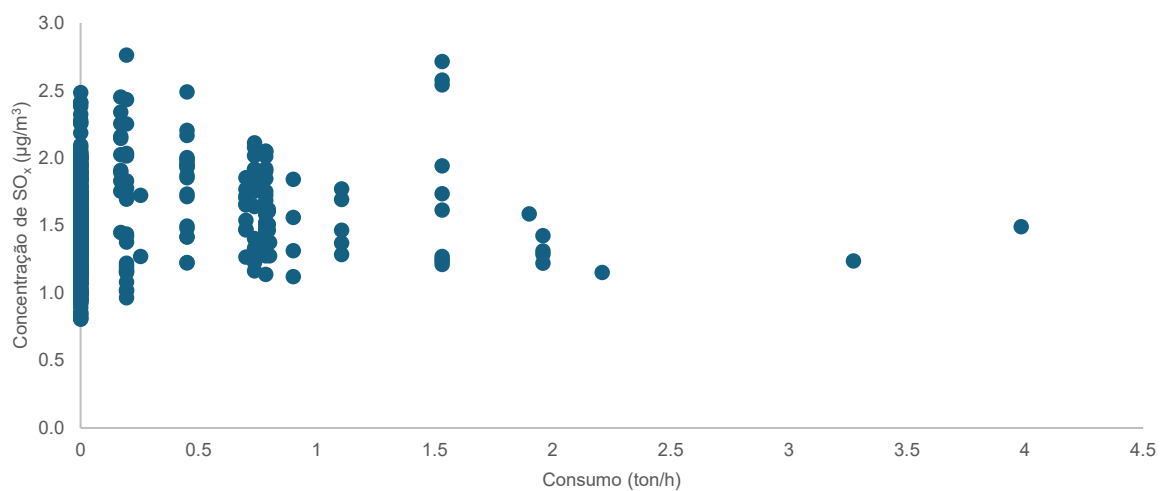
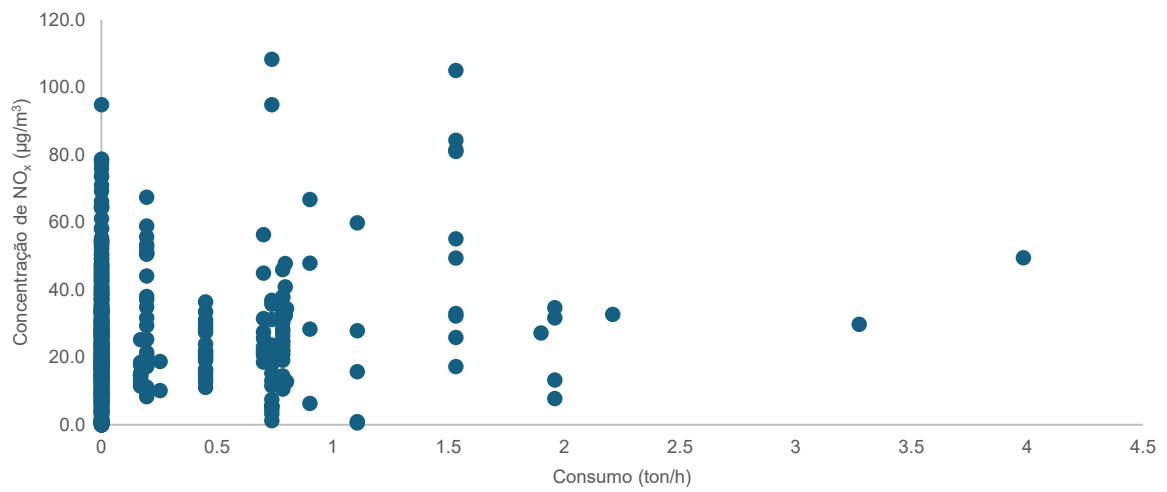
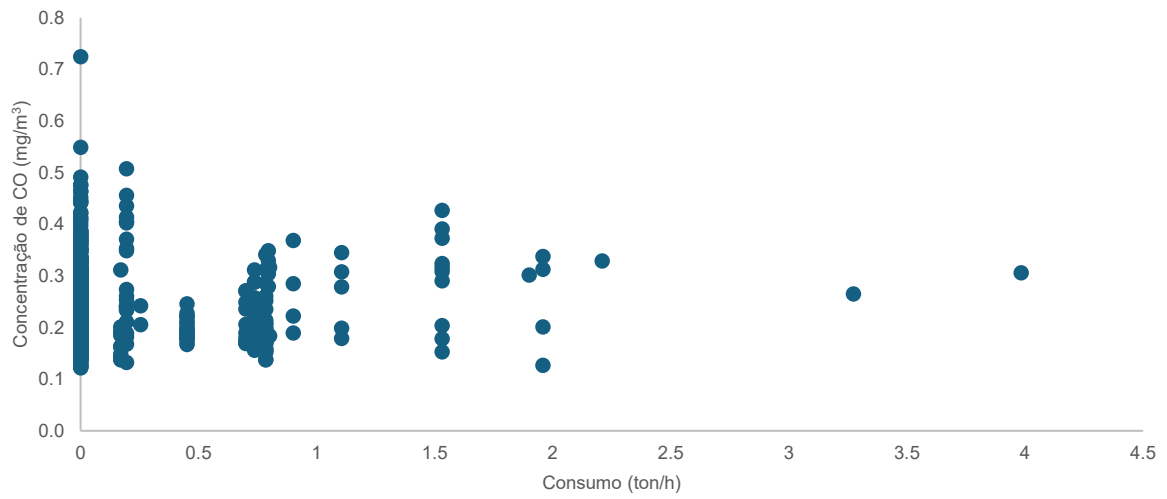


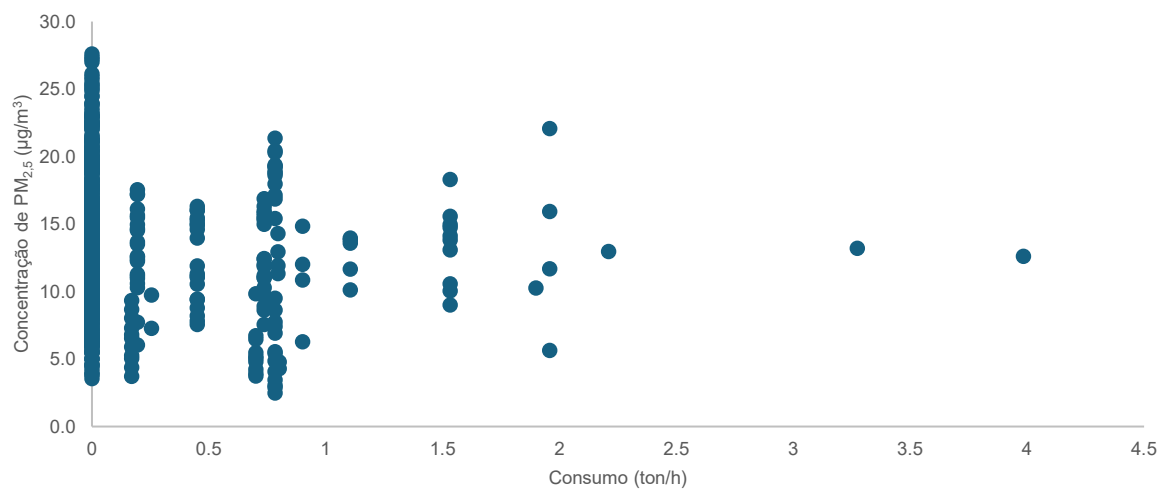
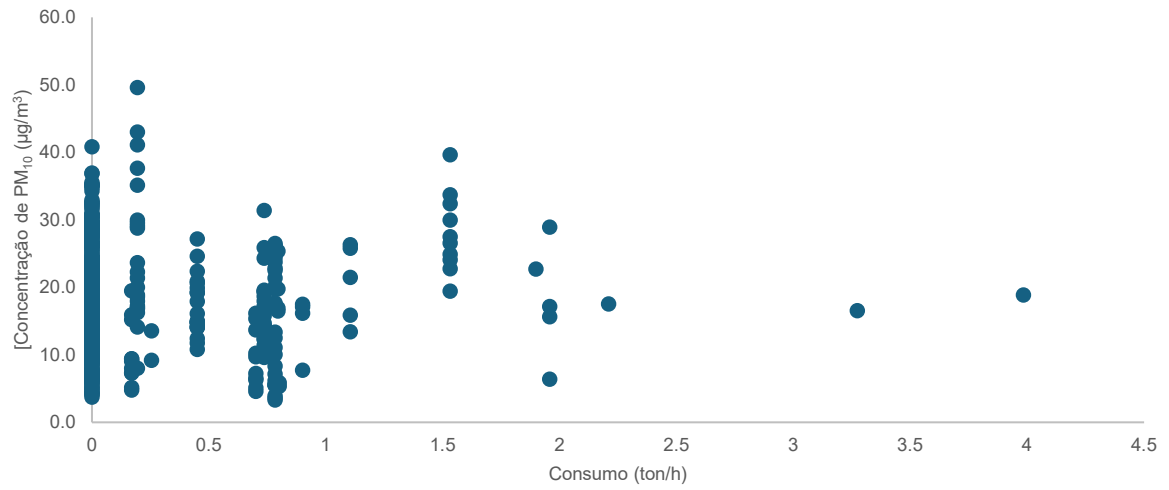
Anexo XXXI – Dispersão no mês de março para o sensor “P2-Móvel”



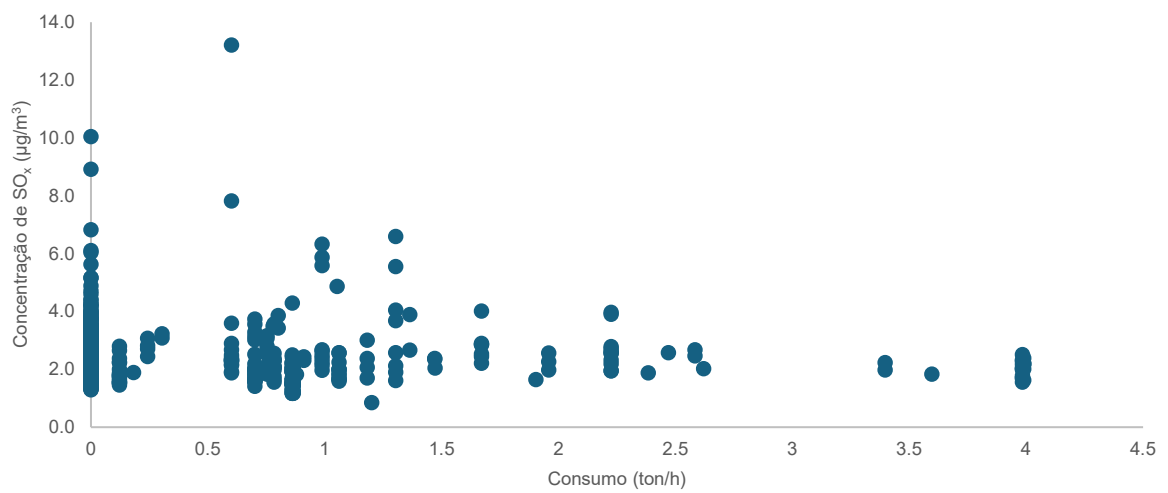
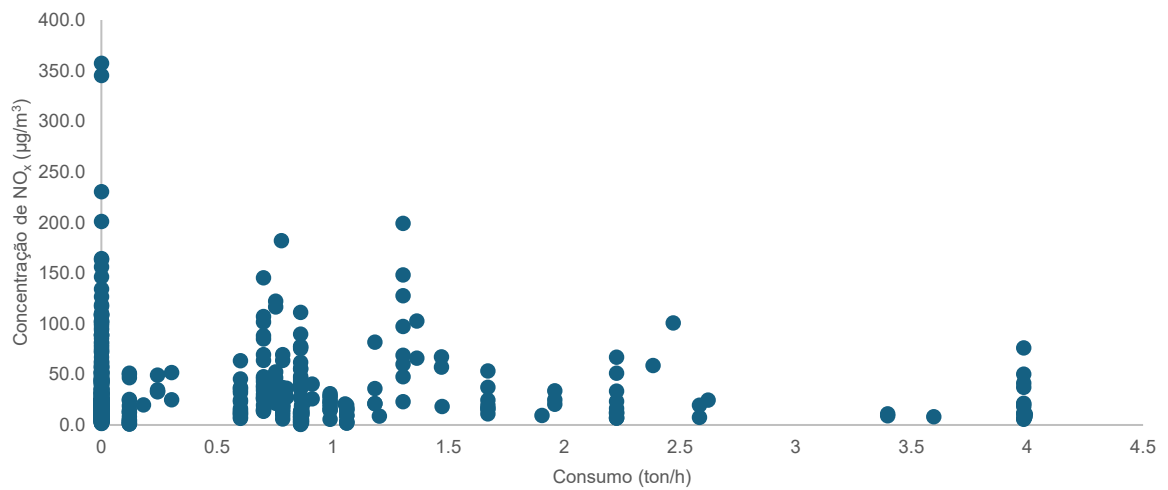
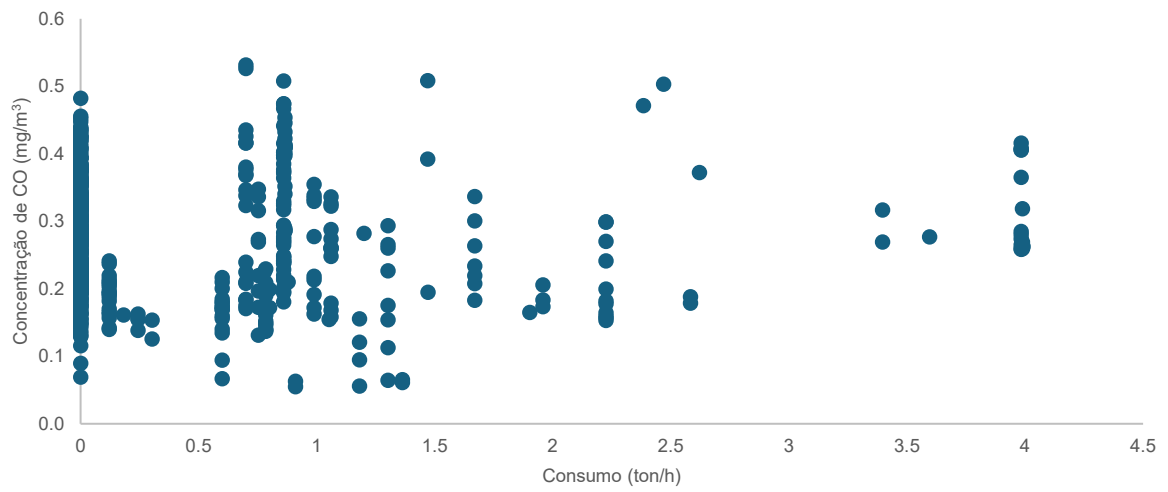


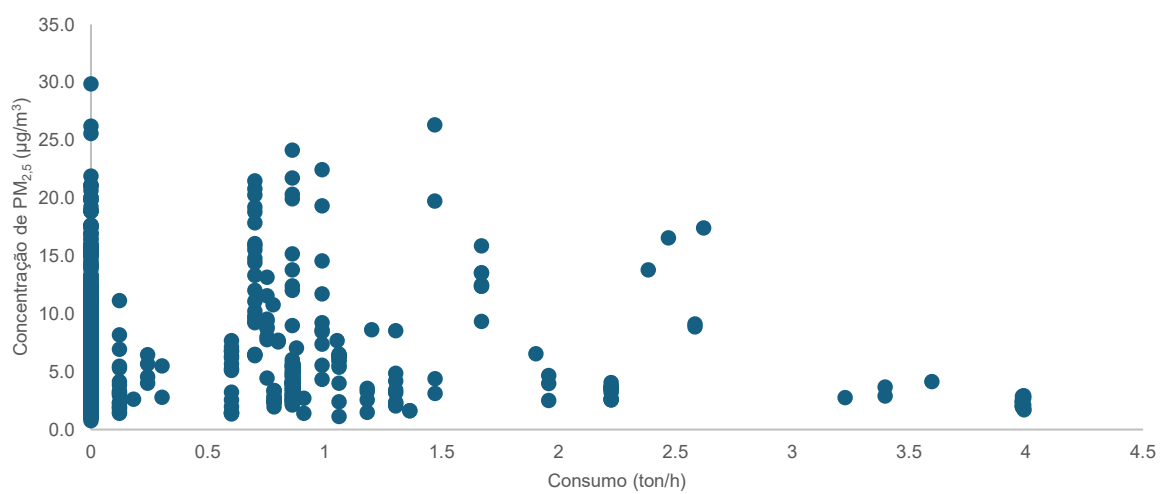
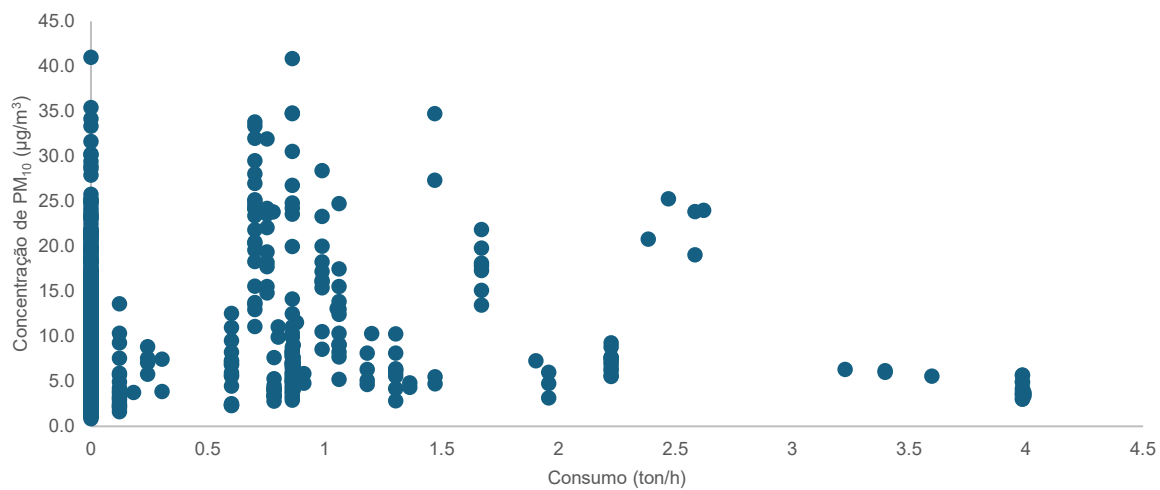
Anexo XXXII– Dispersão no mês de março para o sensor “P3-Móvel”

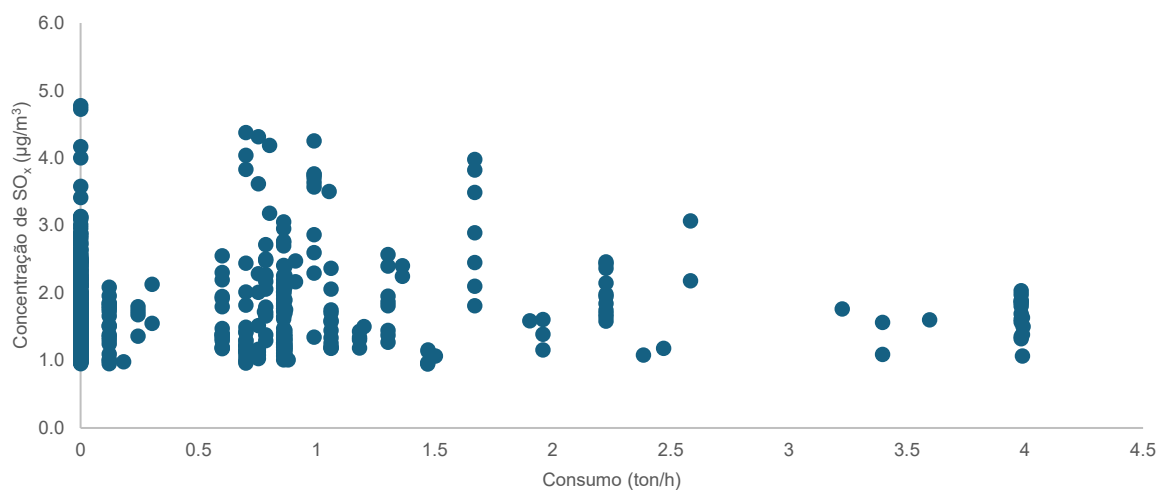
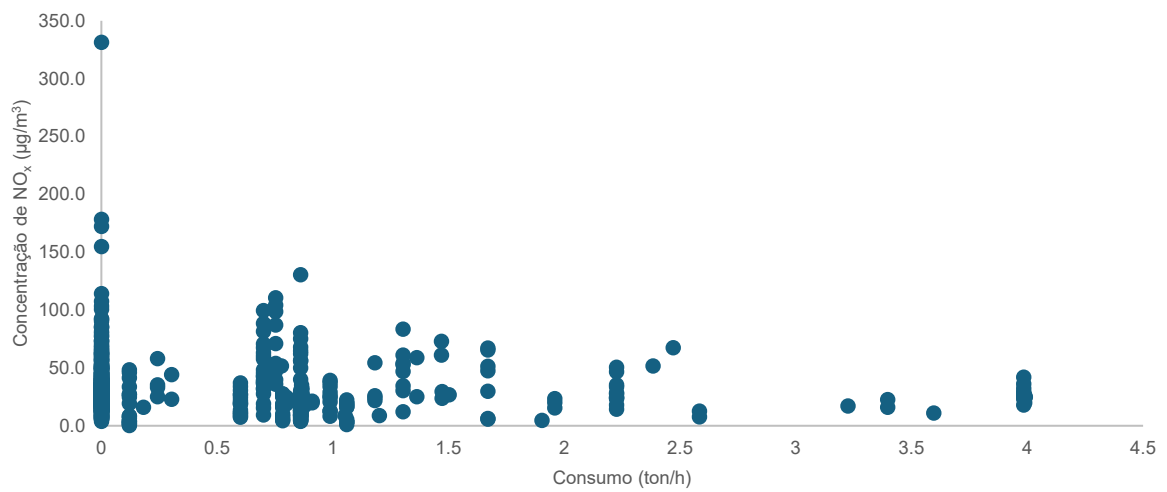
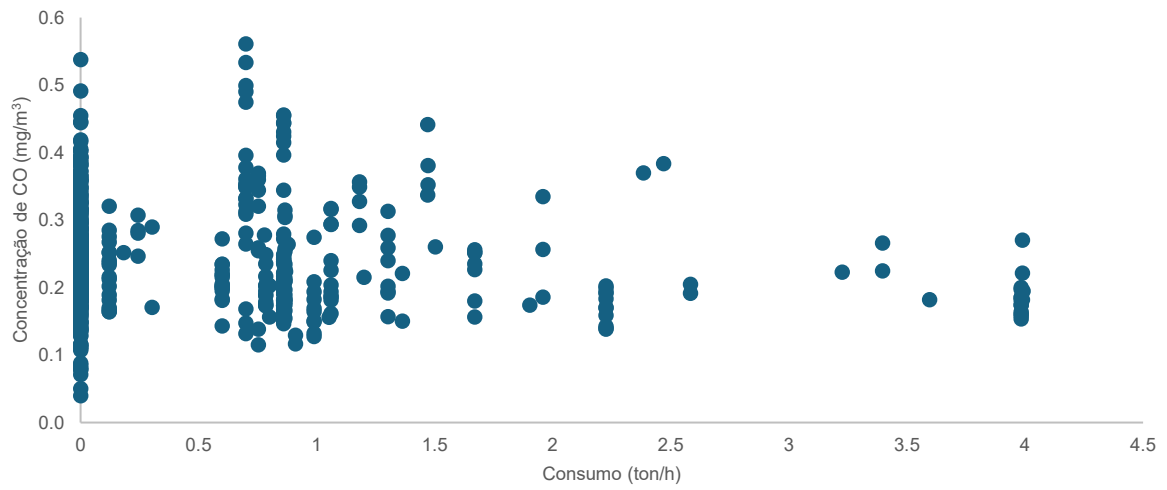


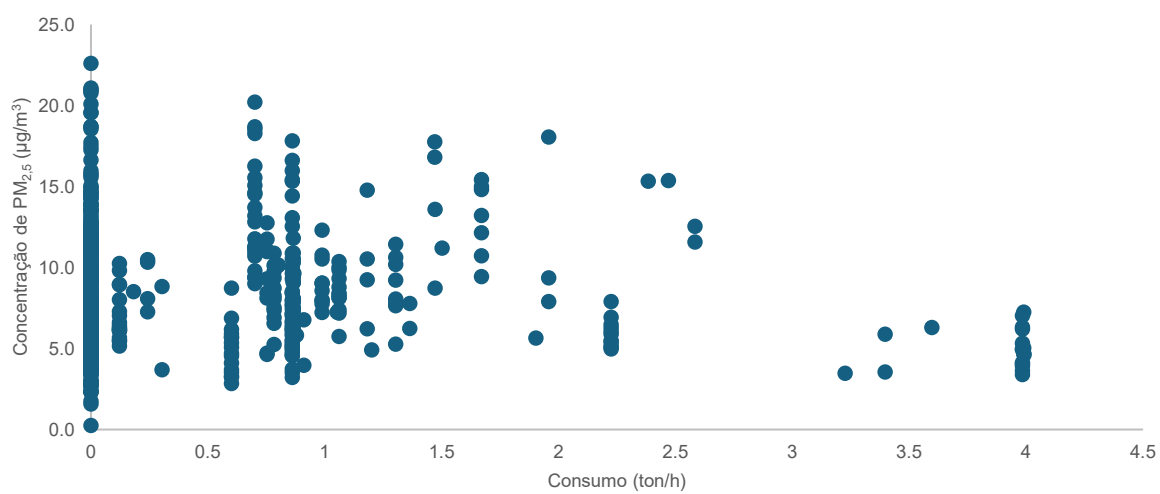
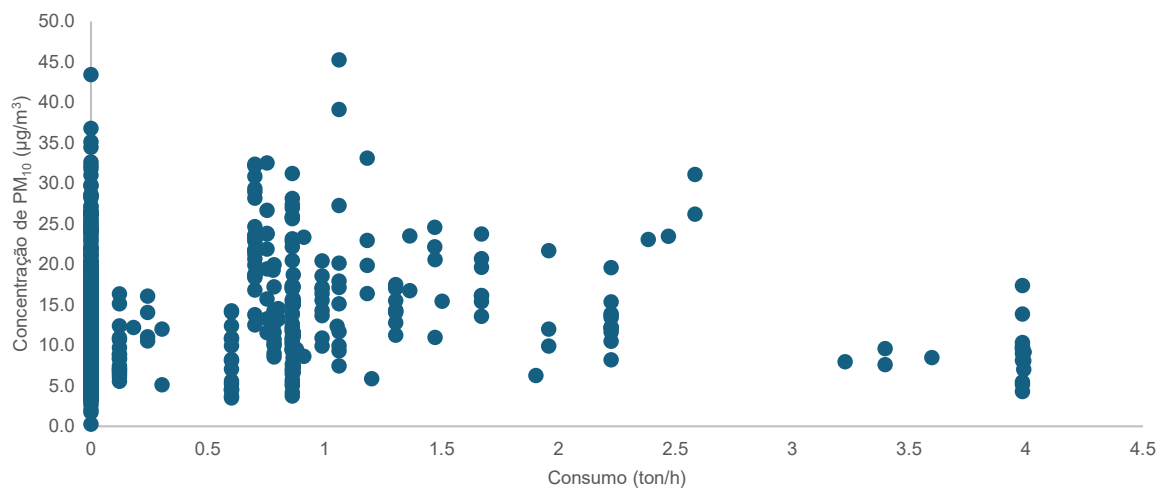


Anexo XXXIII– Dispersão no mês de abril para o sensor “Estação Física”

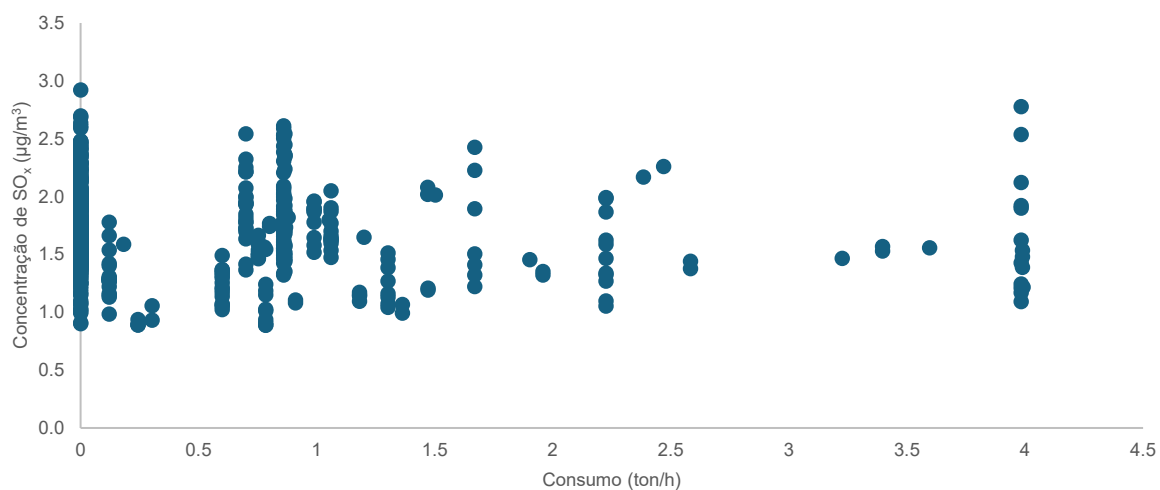
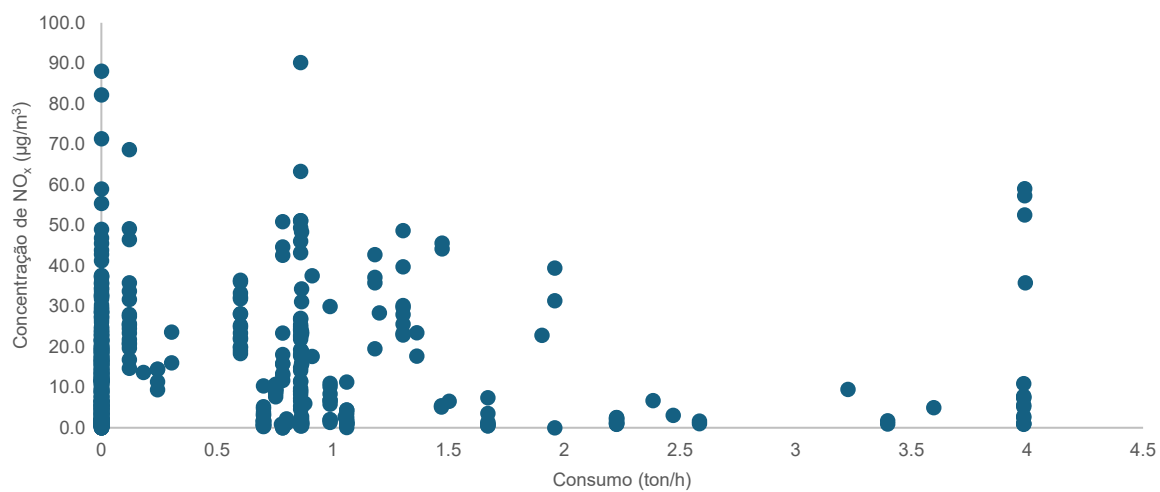
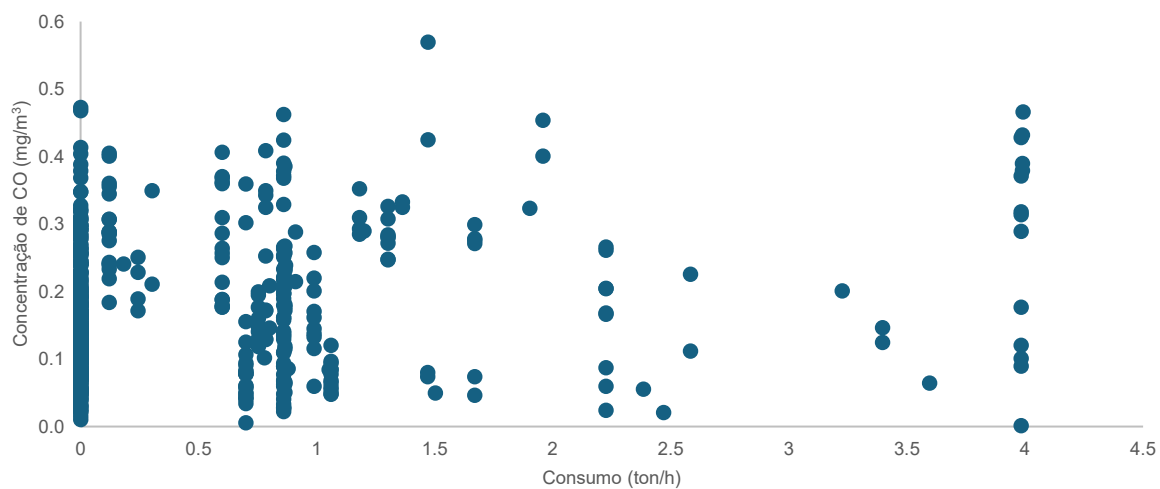


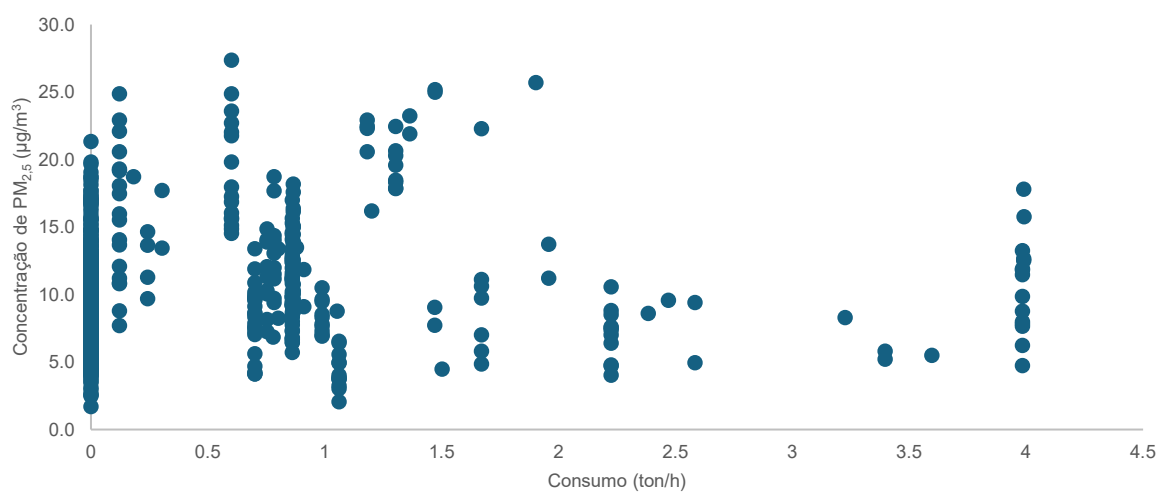
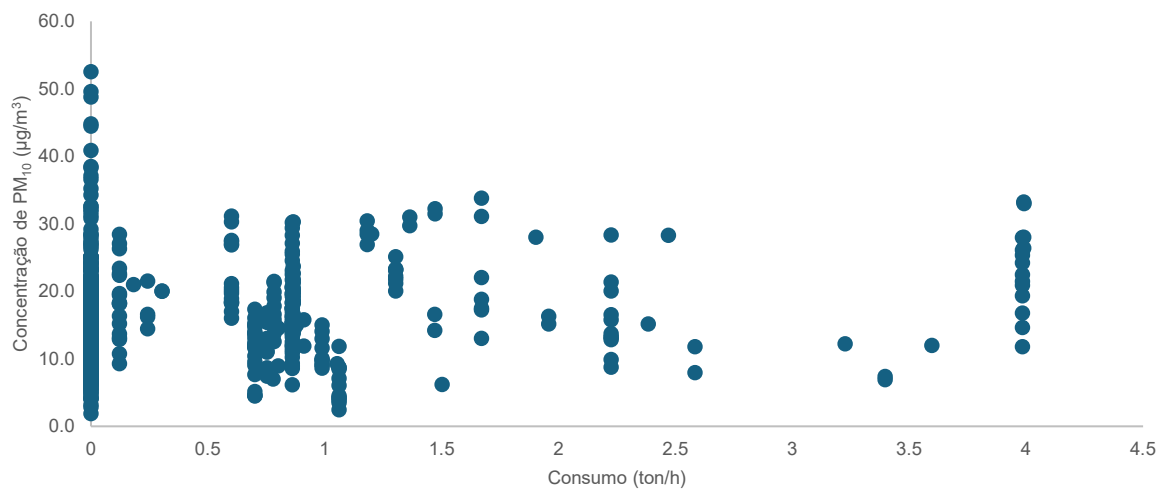


Anexo XXXIV– Dispersão no mês de abril para o sensor “P1-Móvel”

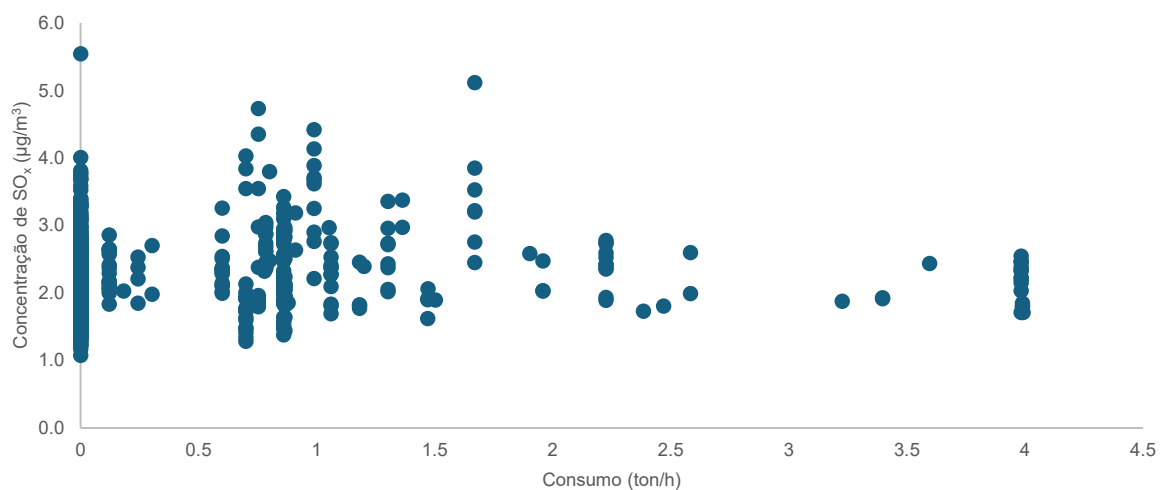
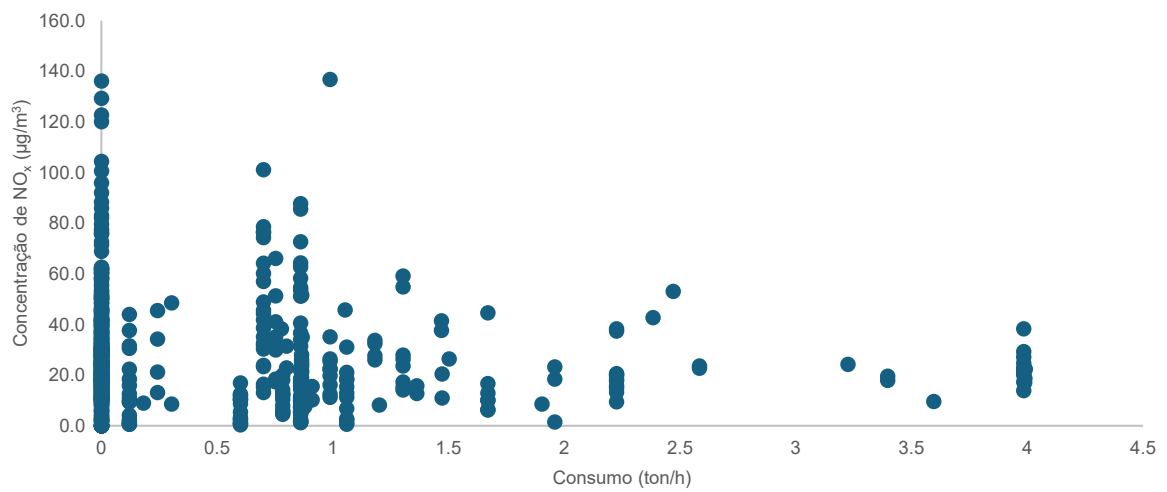
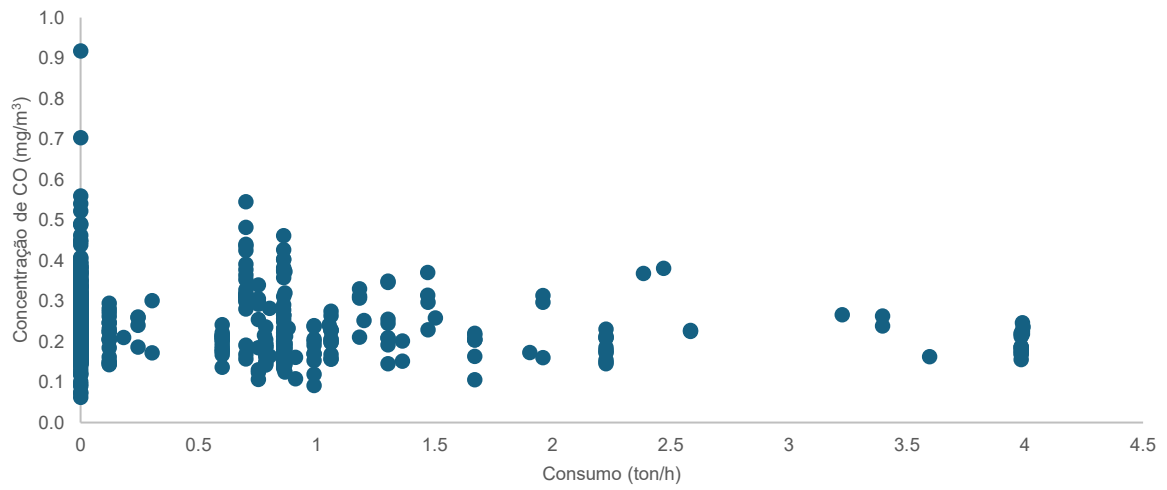


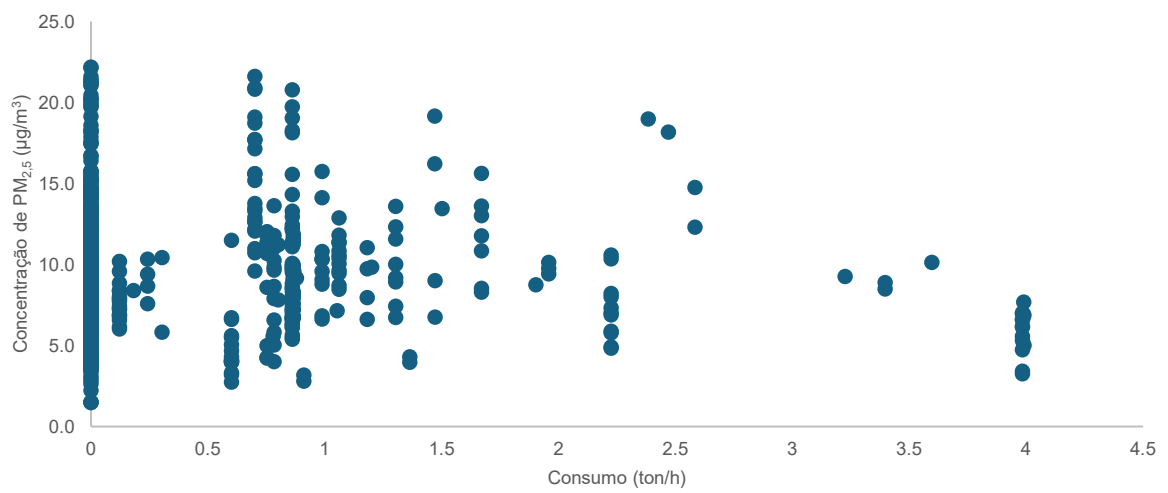
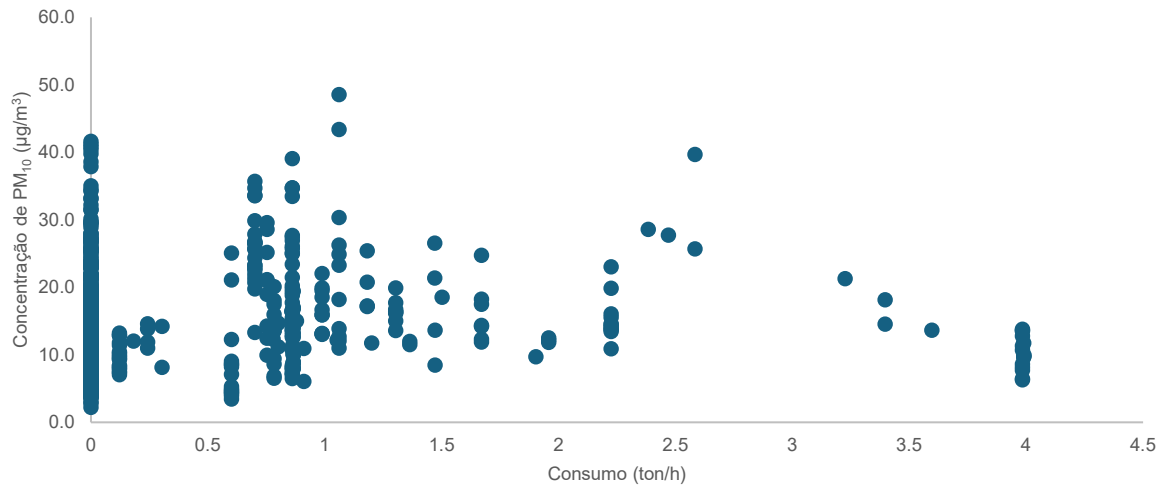
Anexo XXXV – Dispersão no mês de abril para o sensor “P2-Móvel”

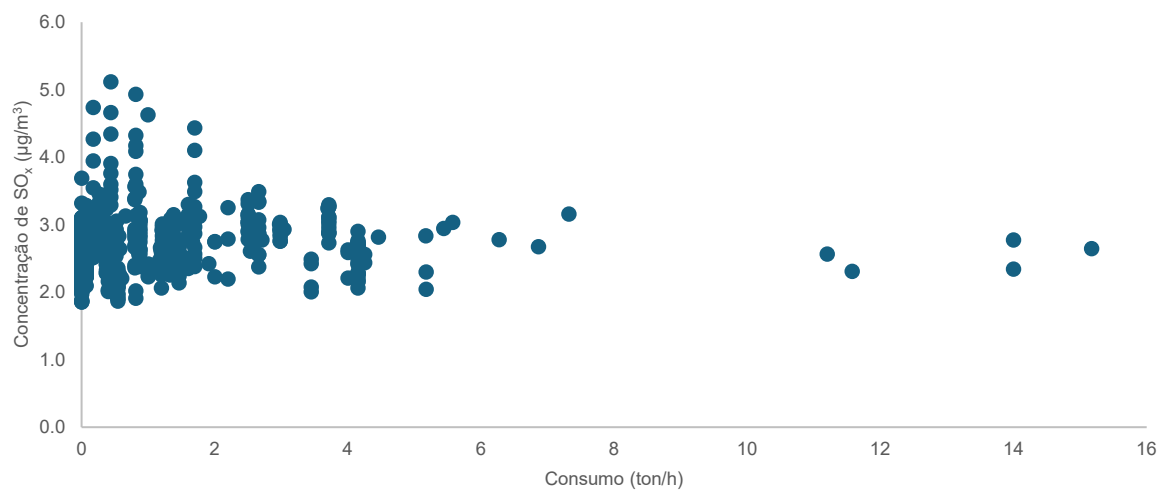
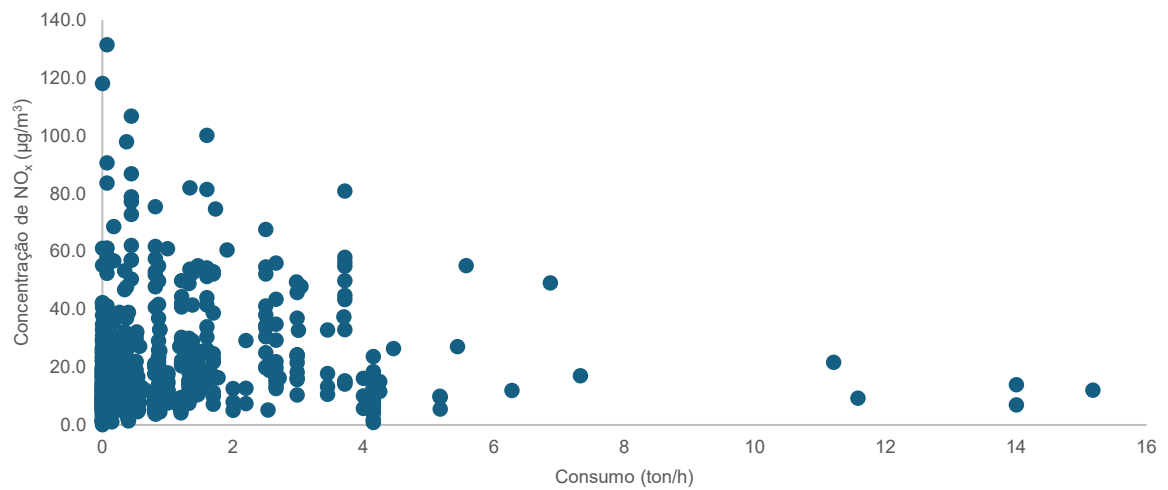
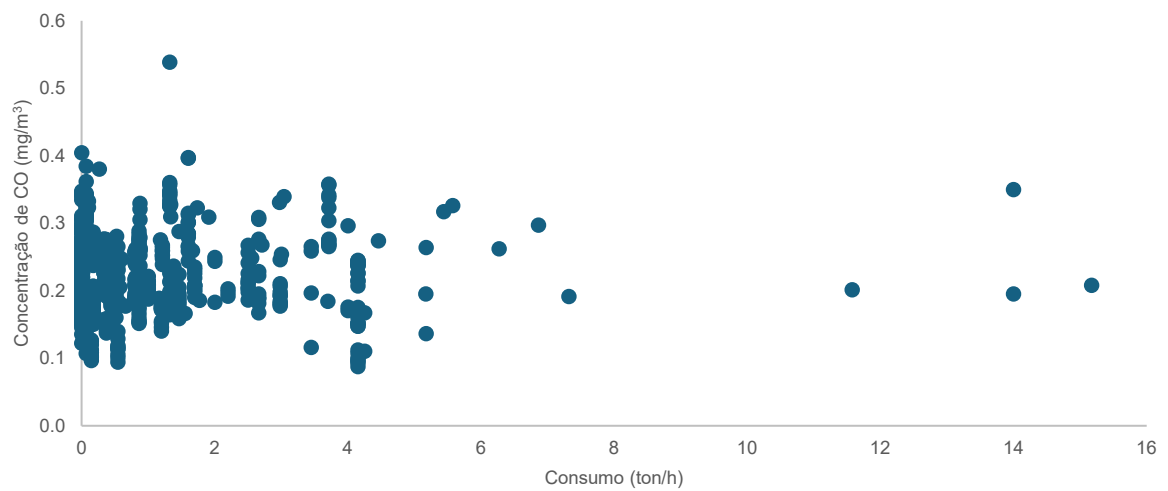


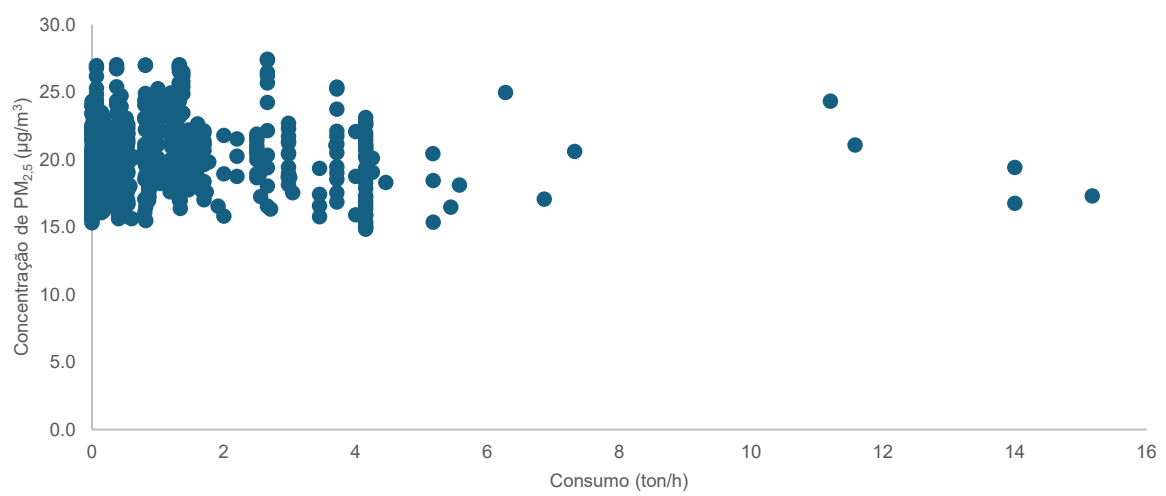
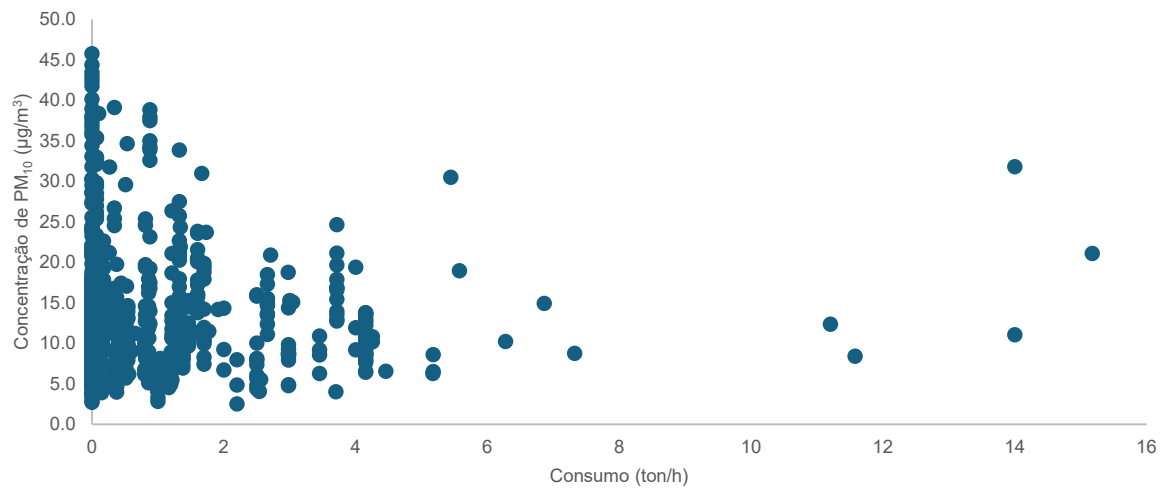


Anexo XXXVI – Dispersão no mês de abril para o sensor “P3-Móvel”

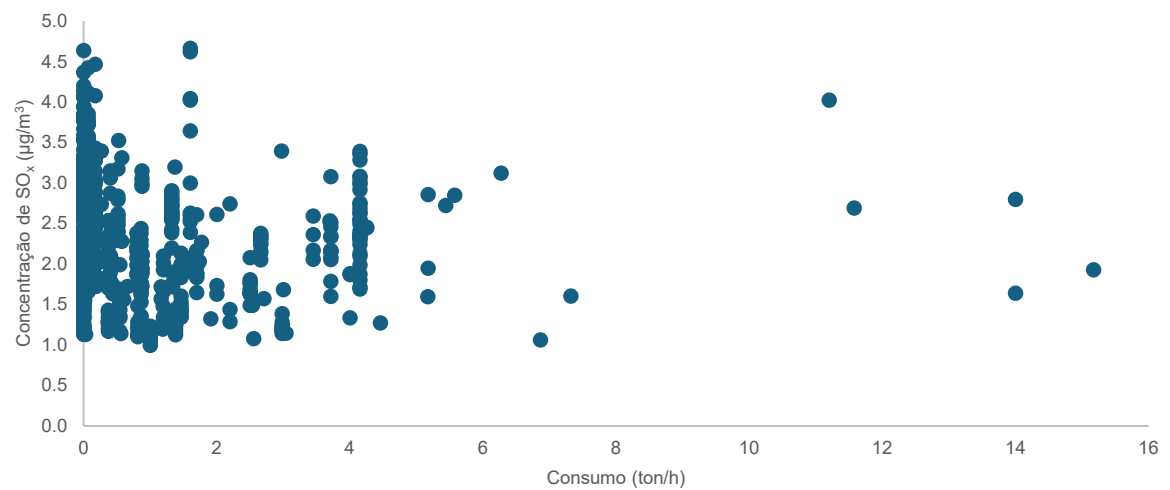
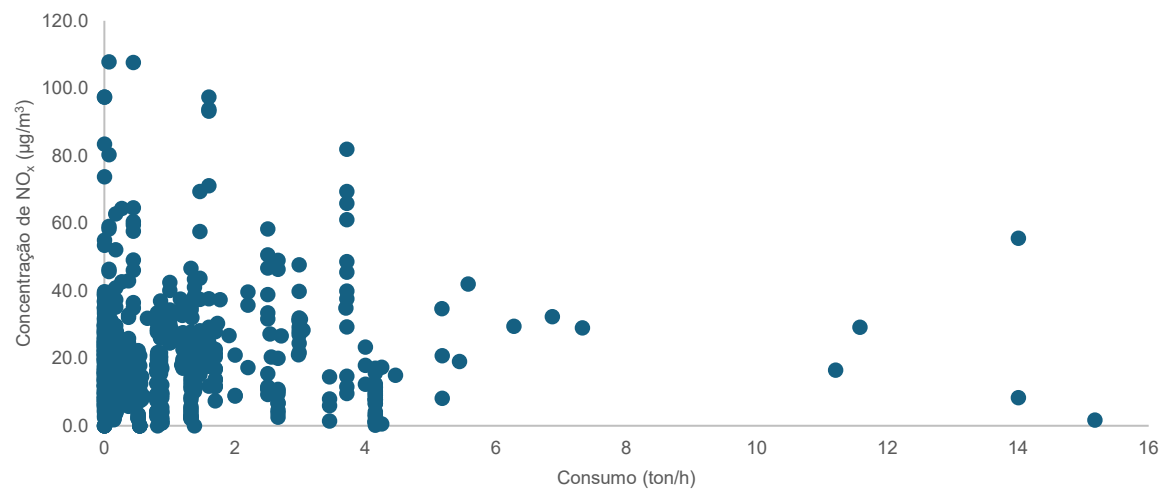
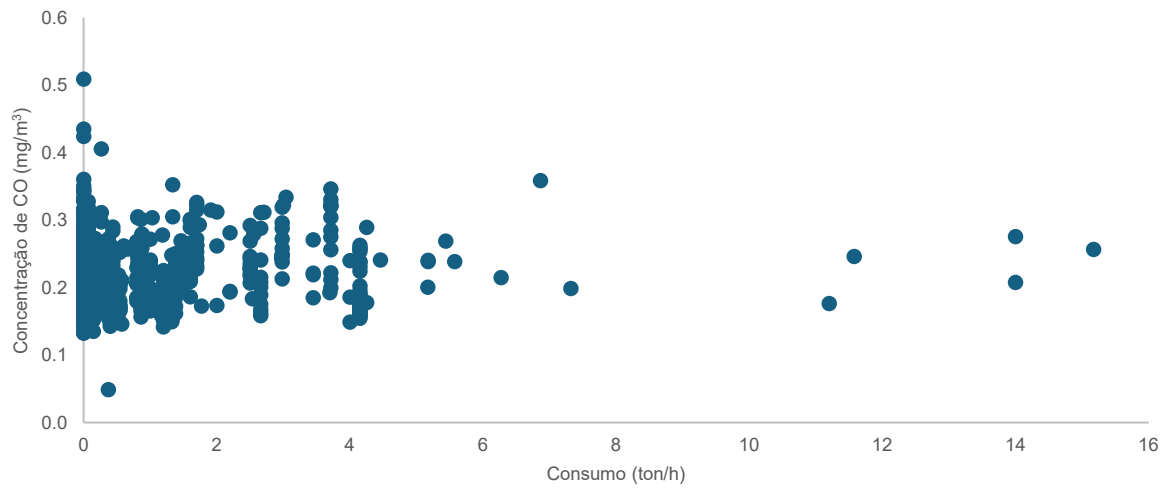


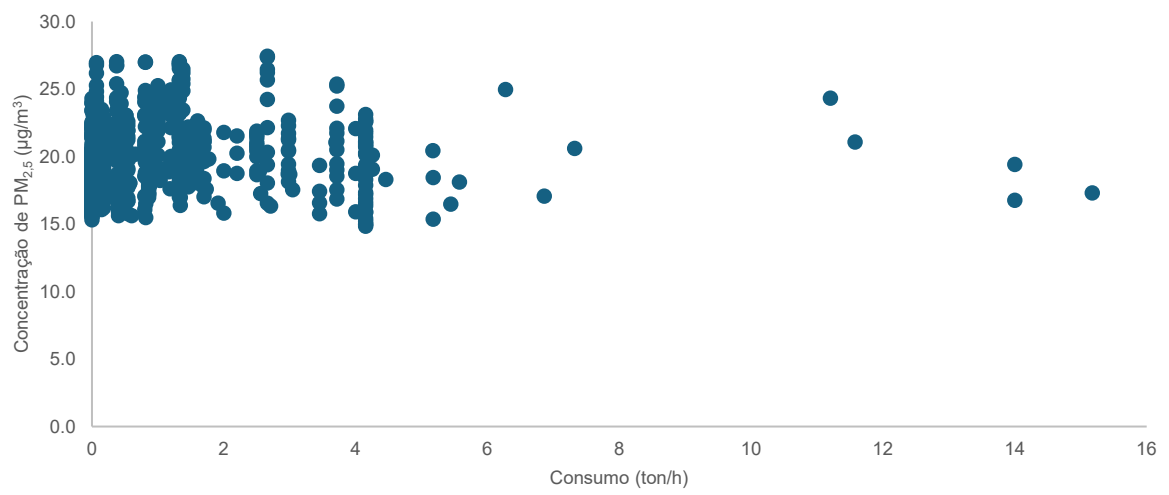
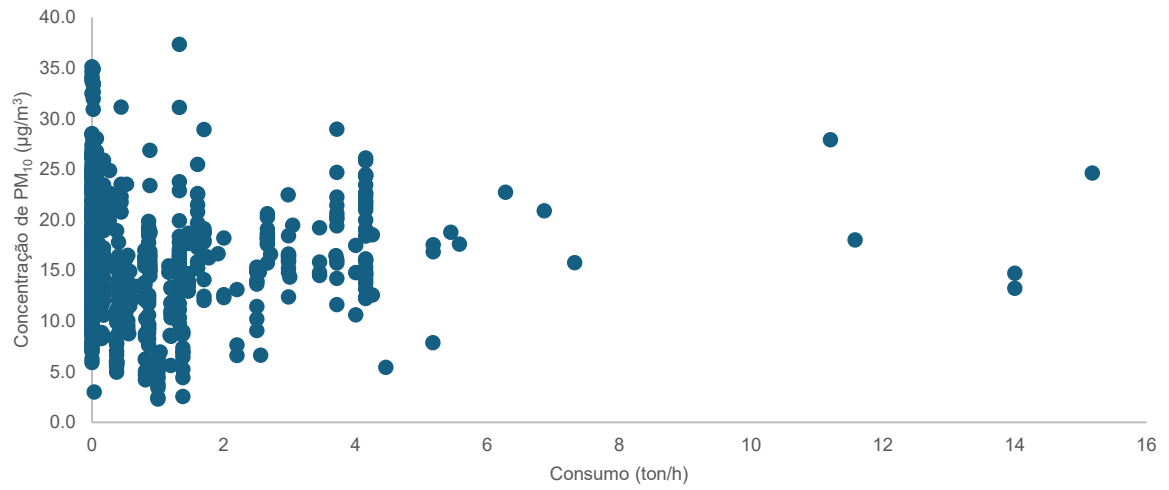


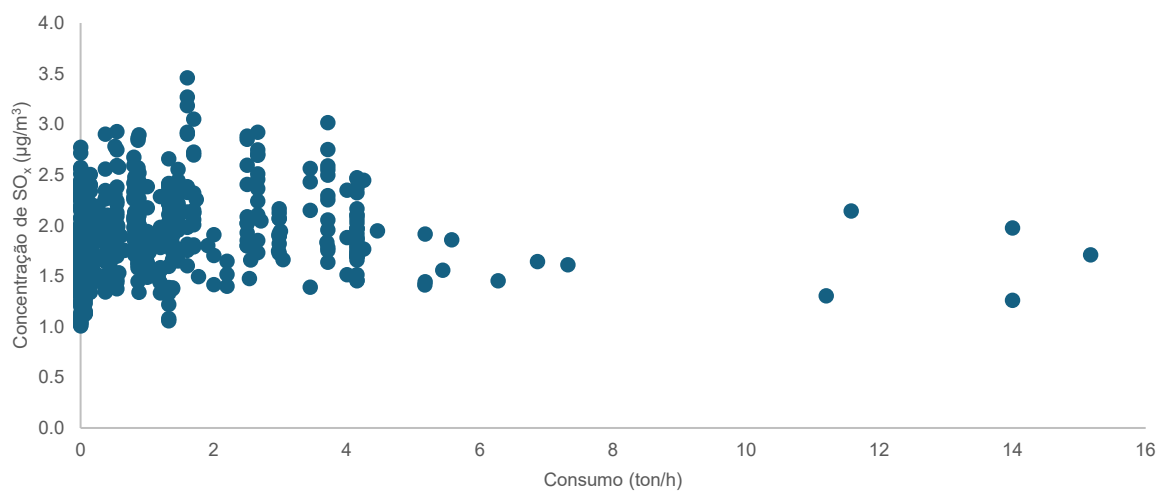
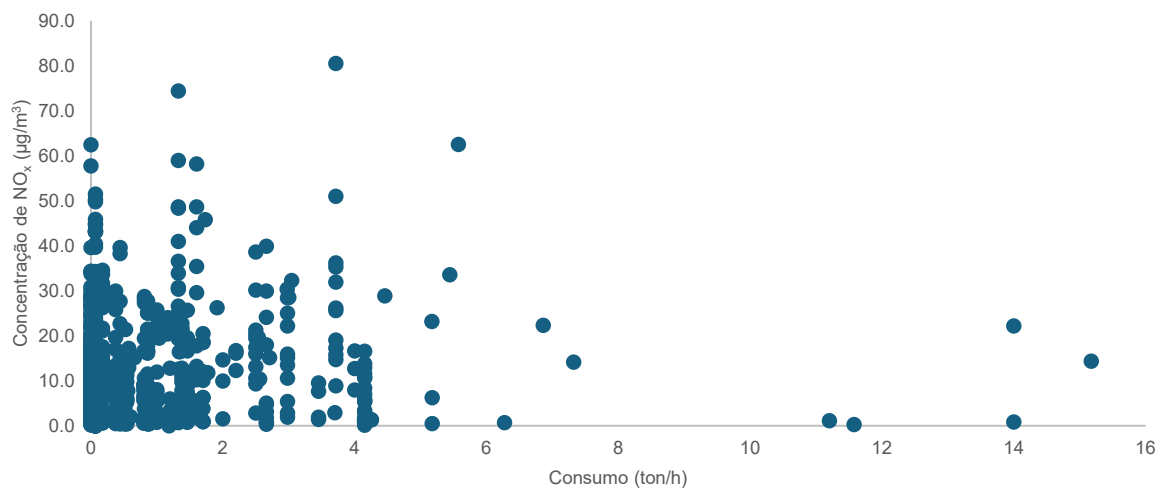
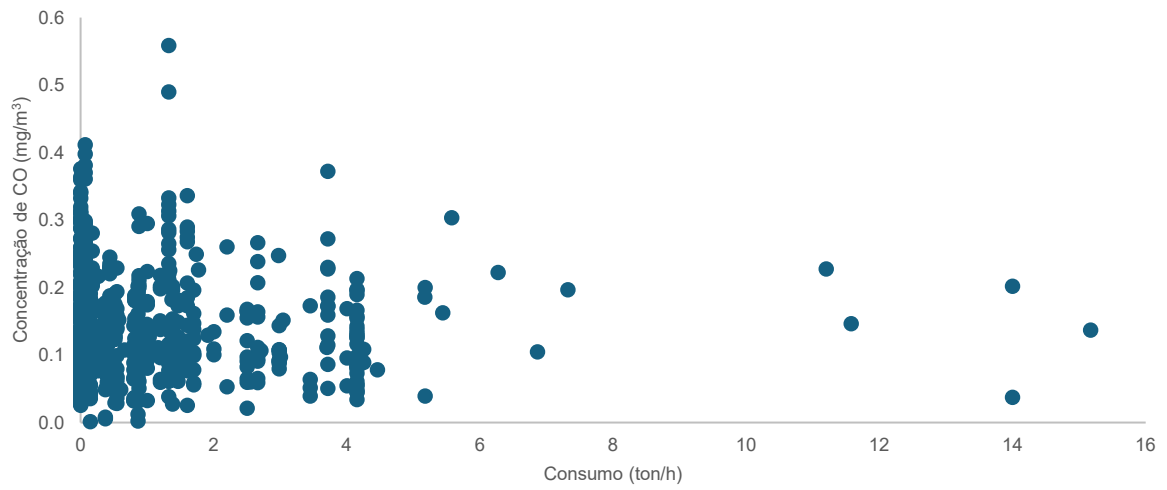
Anexo XXXVII– Dispersão no mês de maio para o sensor “Estação Física”

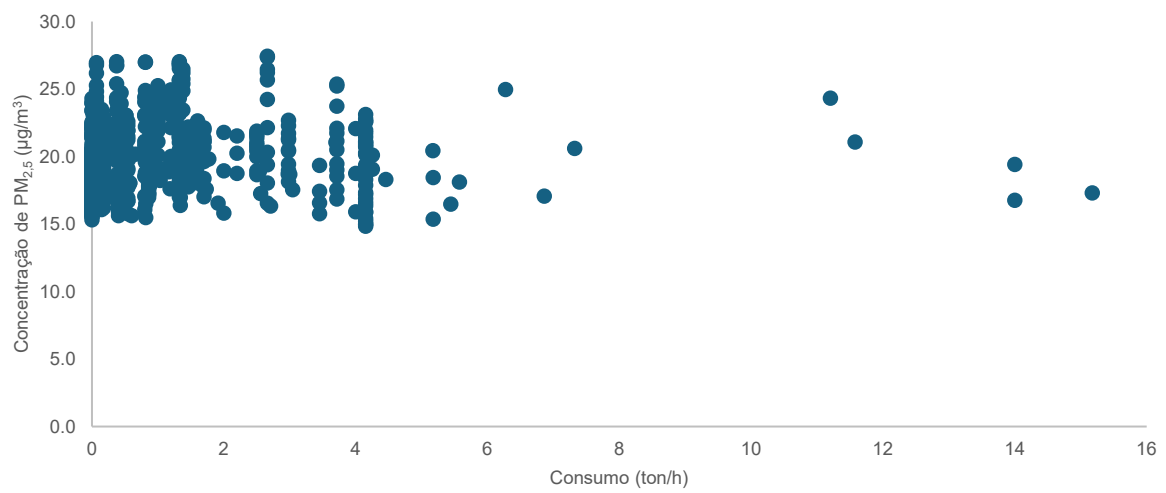
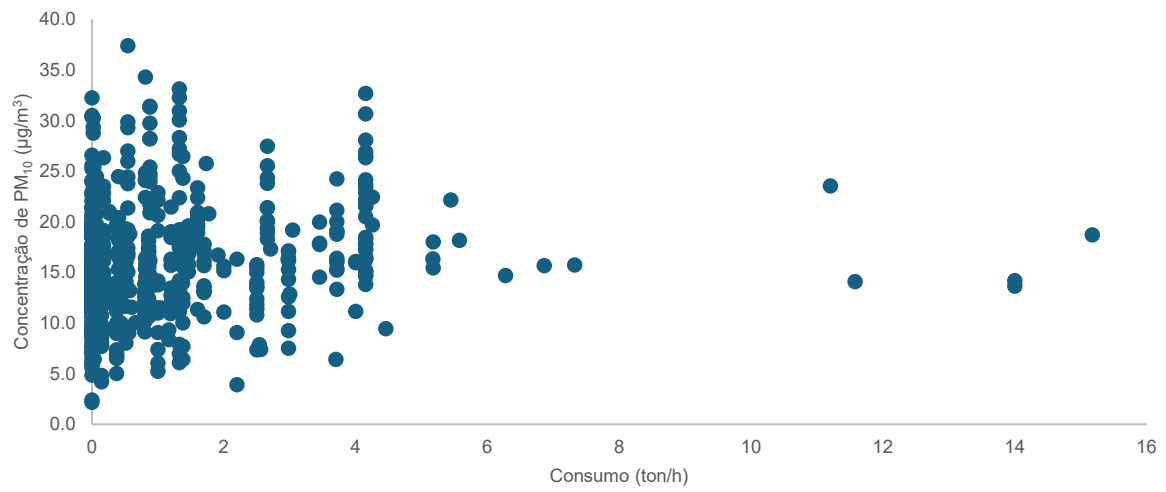


Anexo XXXVIII– Dispersão no mês de maio para o sensor “P1-Móvel”

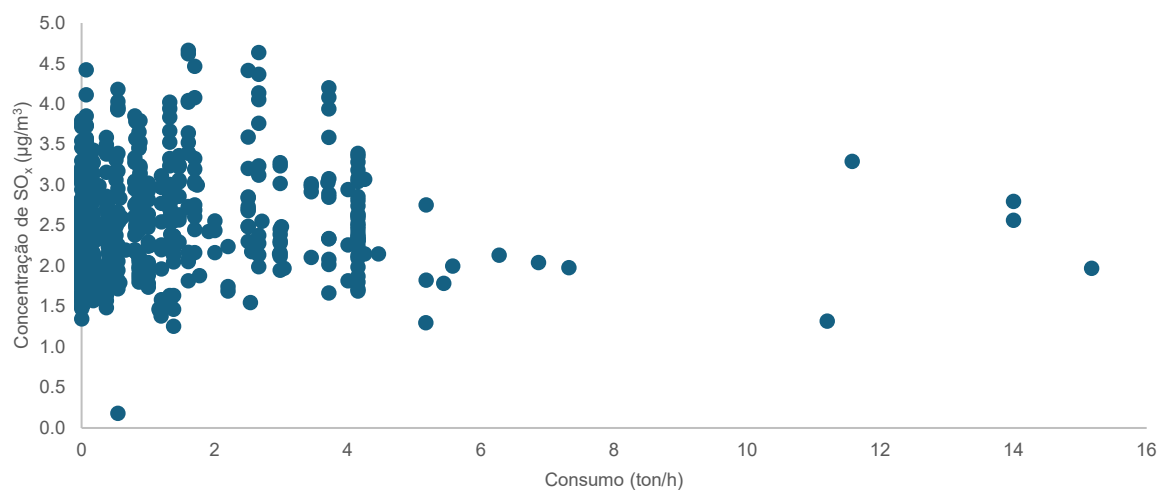
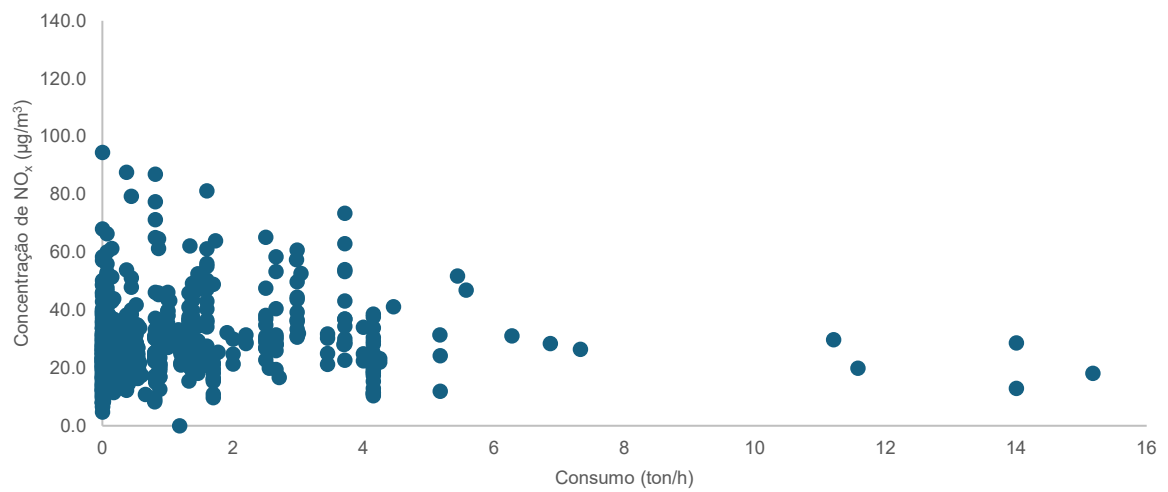
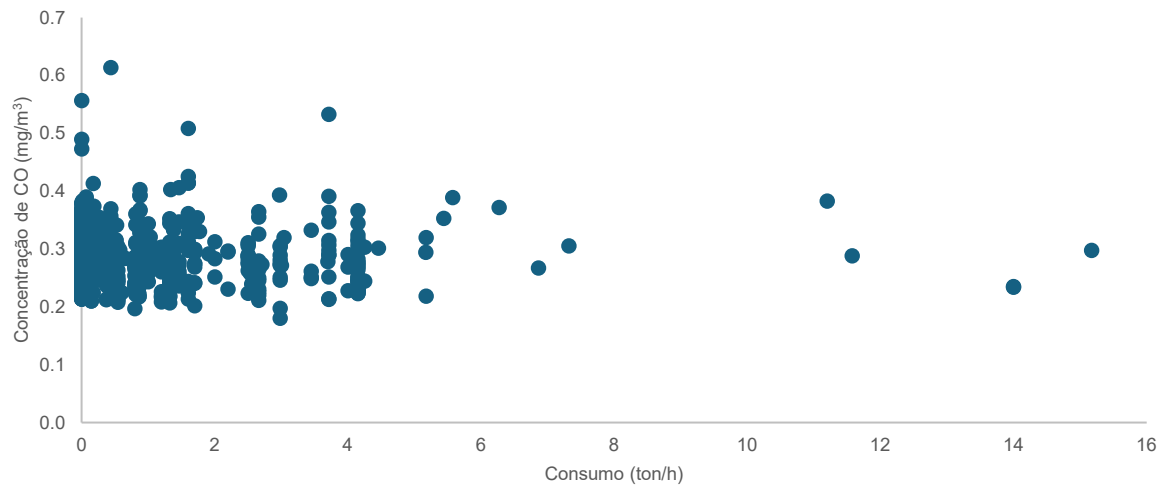


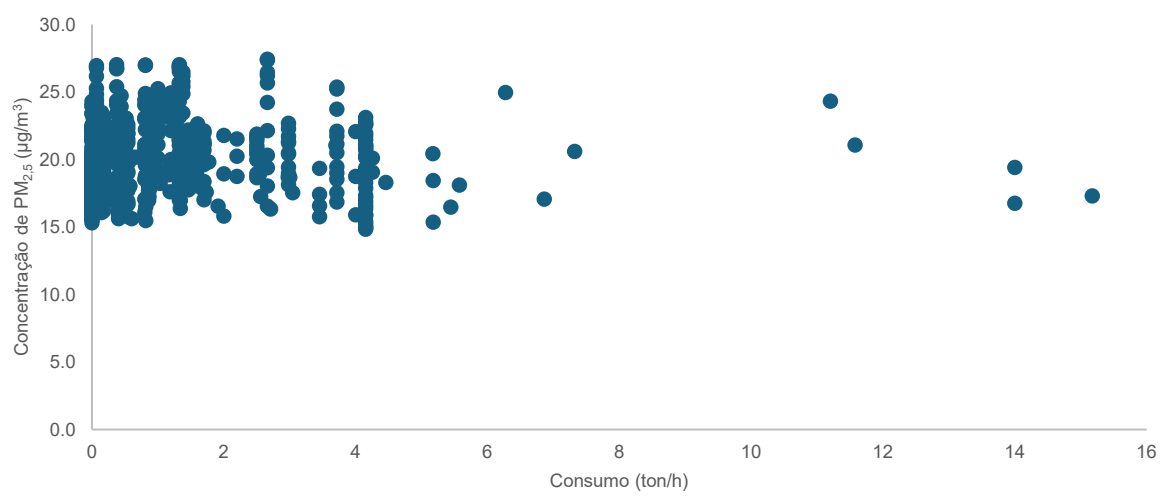
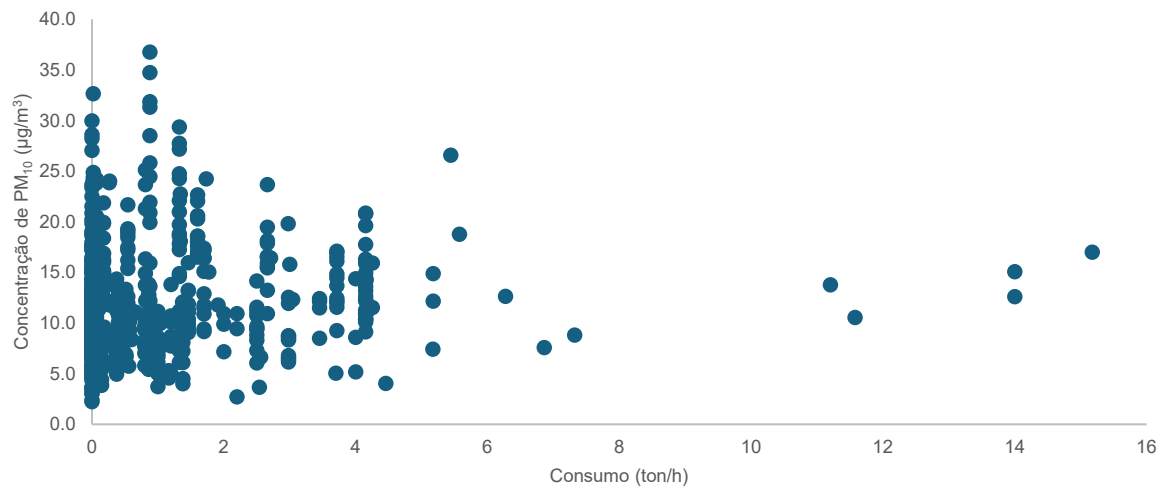


Anexo XXXIX– Dispersão no mês de maio para o sensor “P2-Móvel”

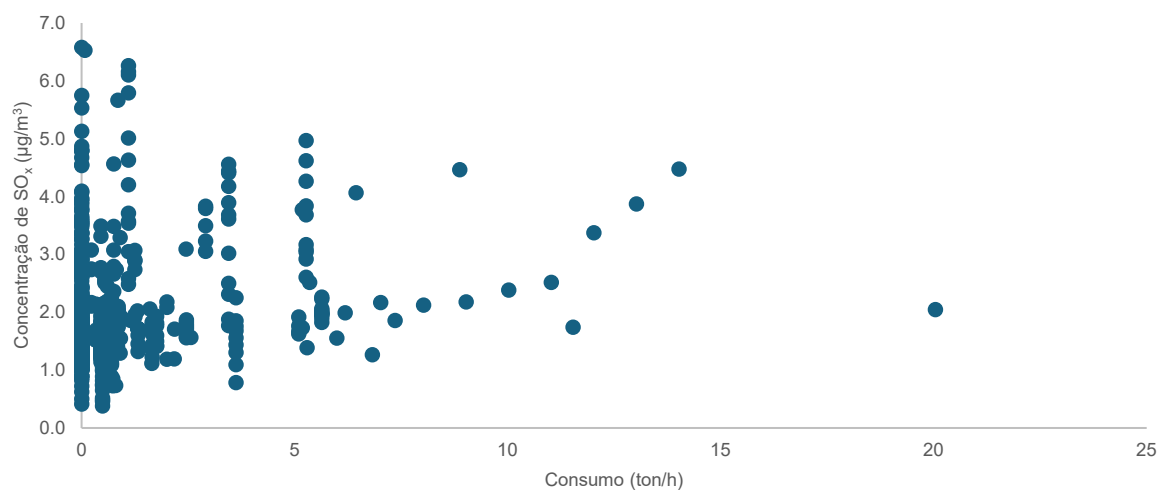
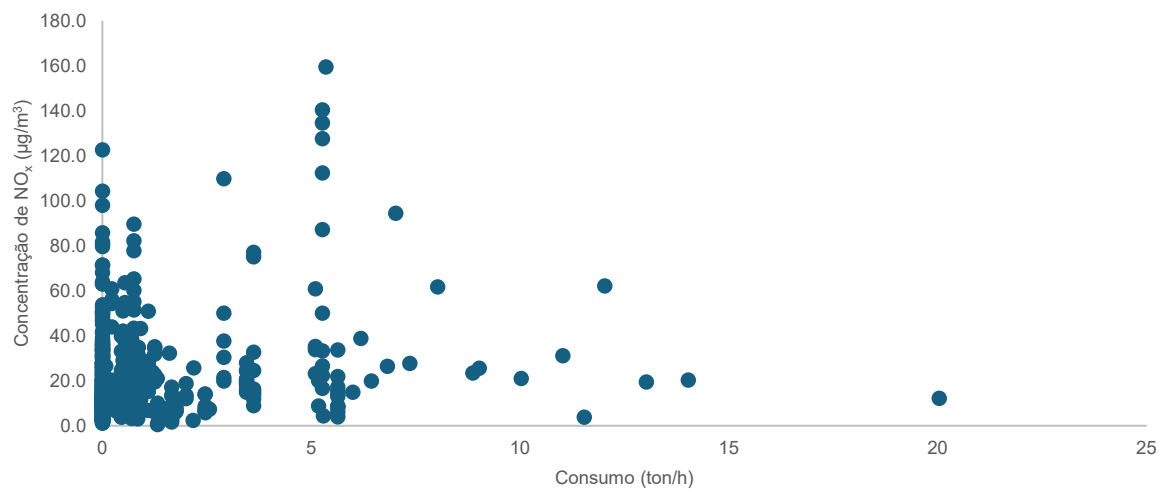
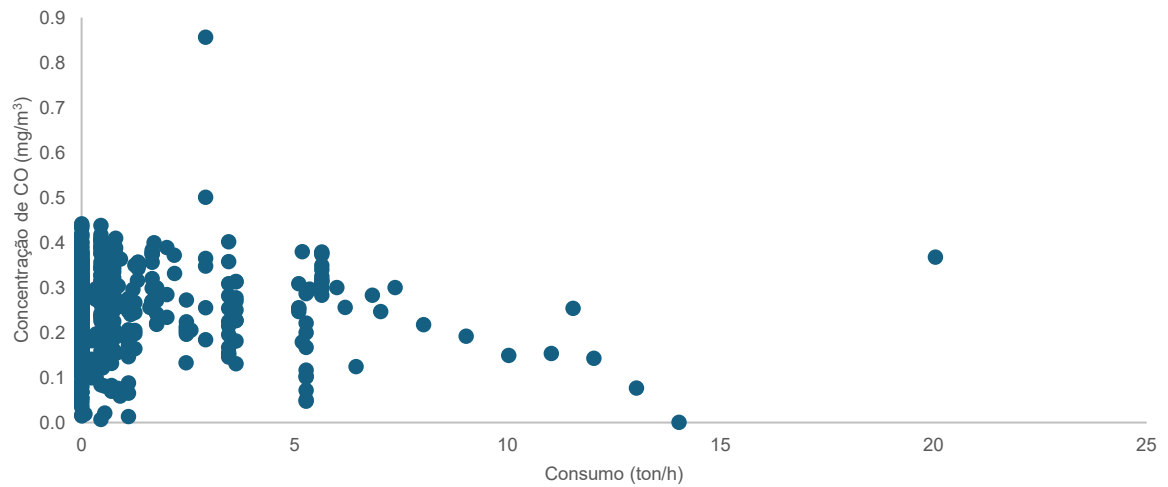


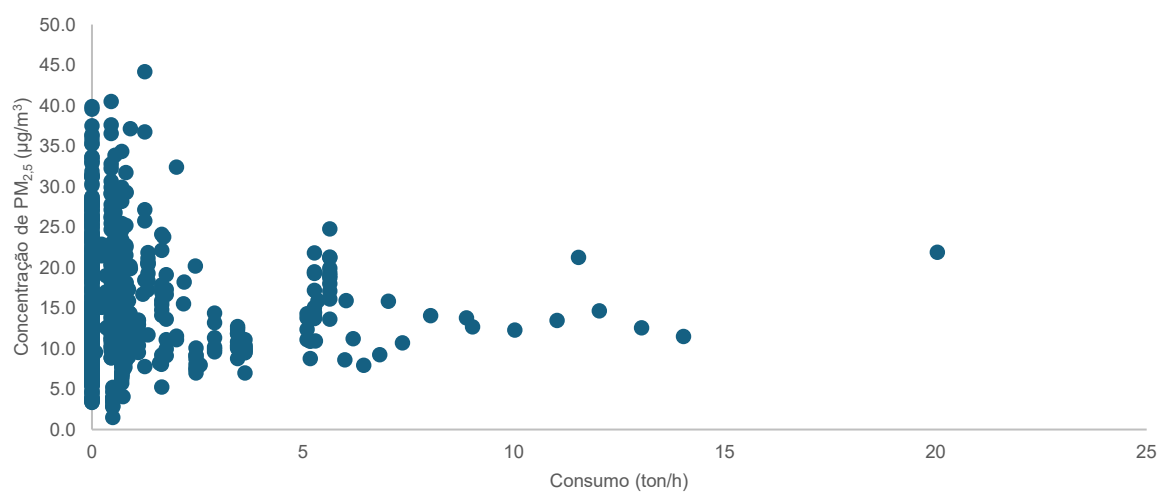
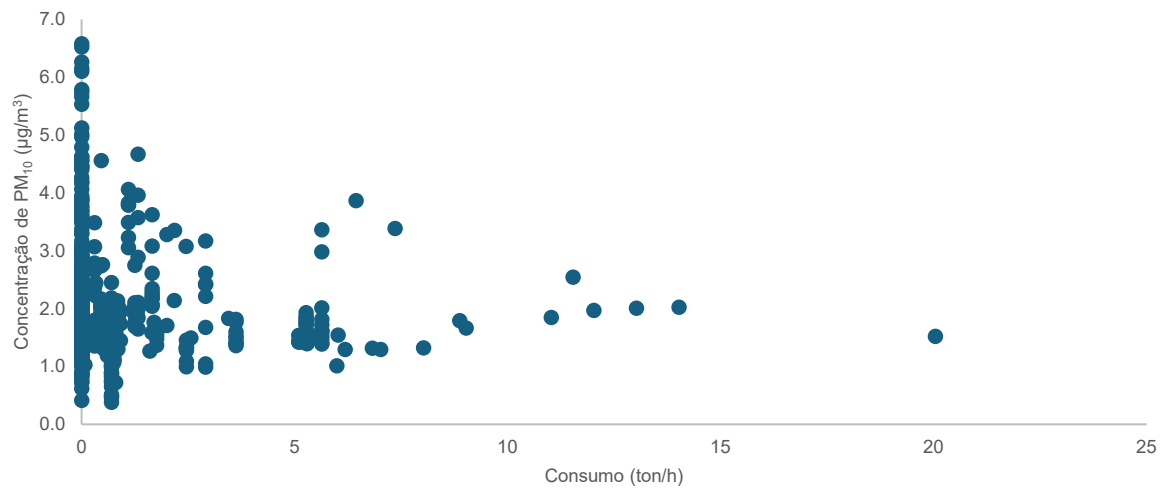
Anexo XL– Dispersão no mês de maio para o sensor “P3-Móvel”



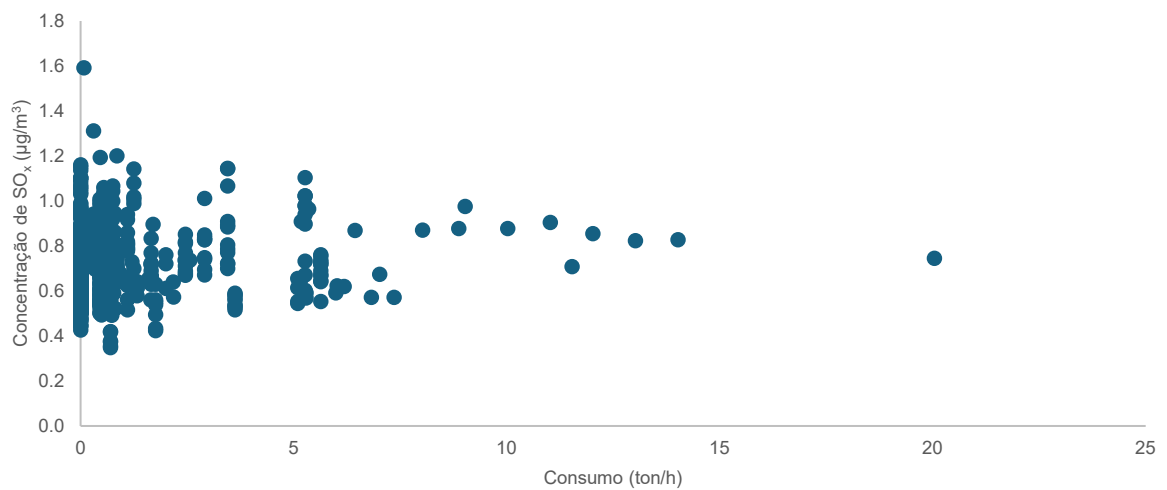
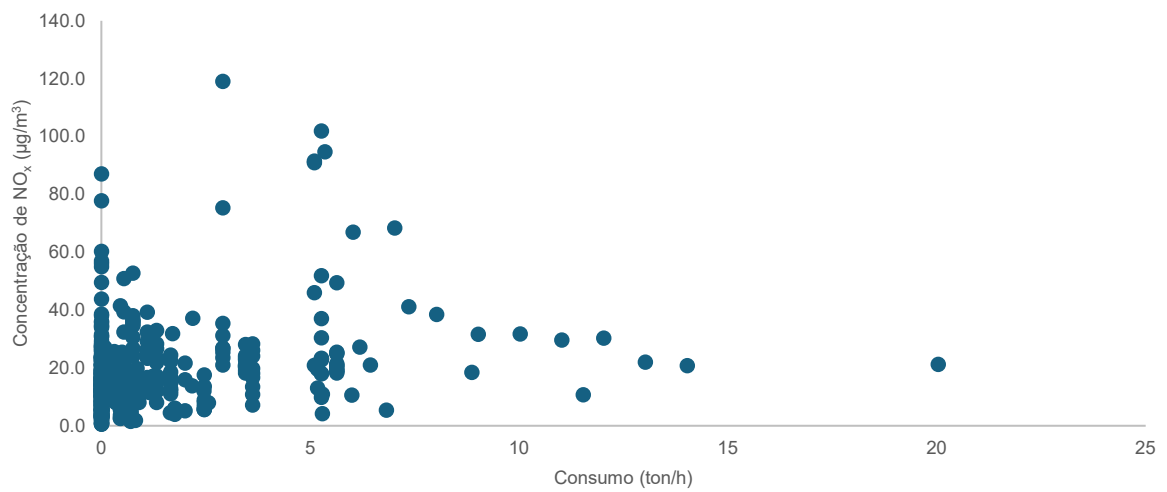
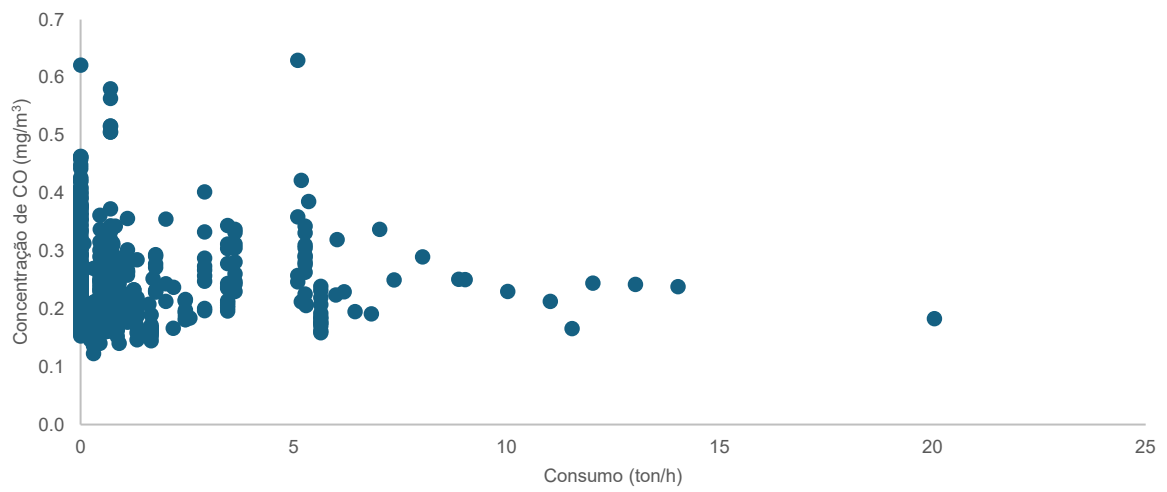


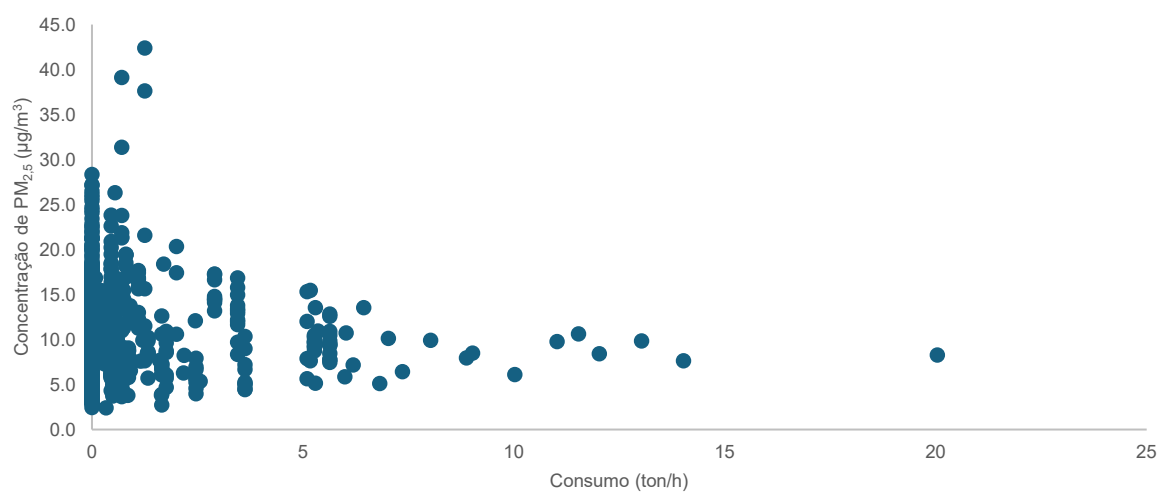
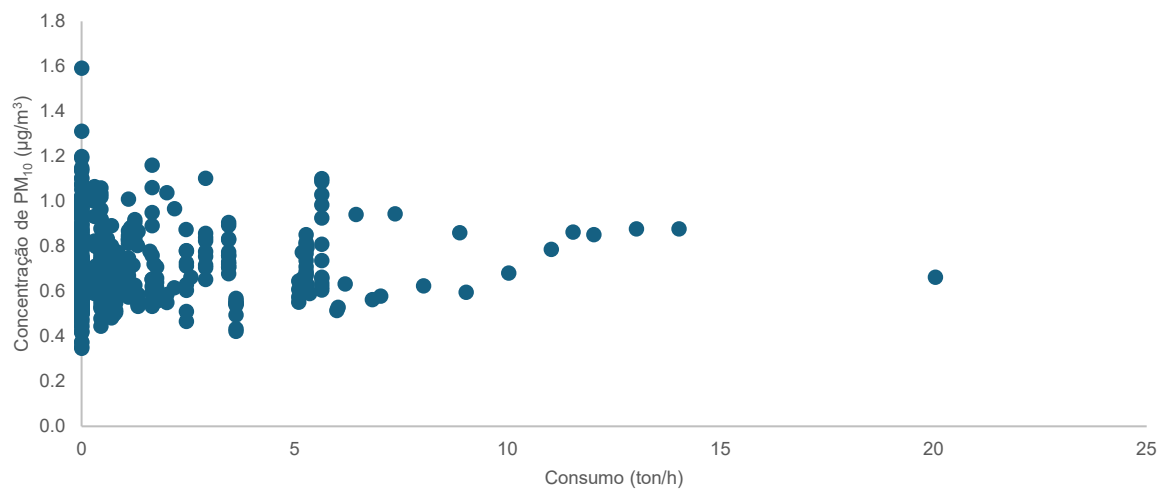
Anexo XLI– Dispersão no mês de junho para o sensor “Estação Física”

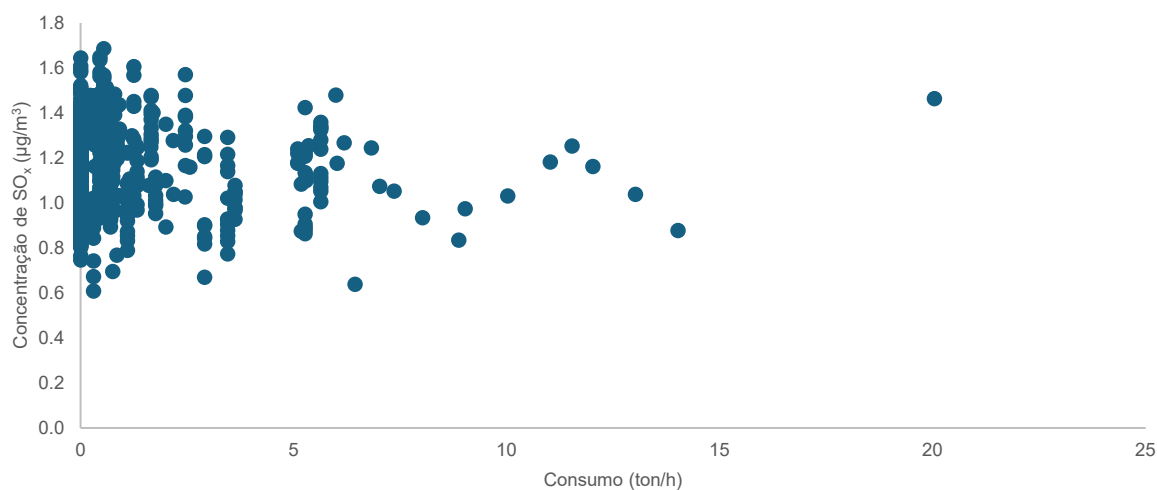
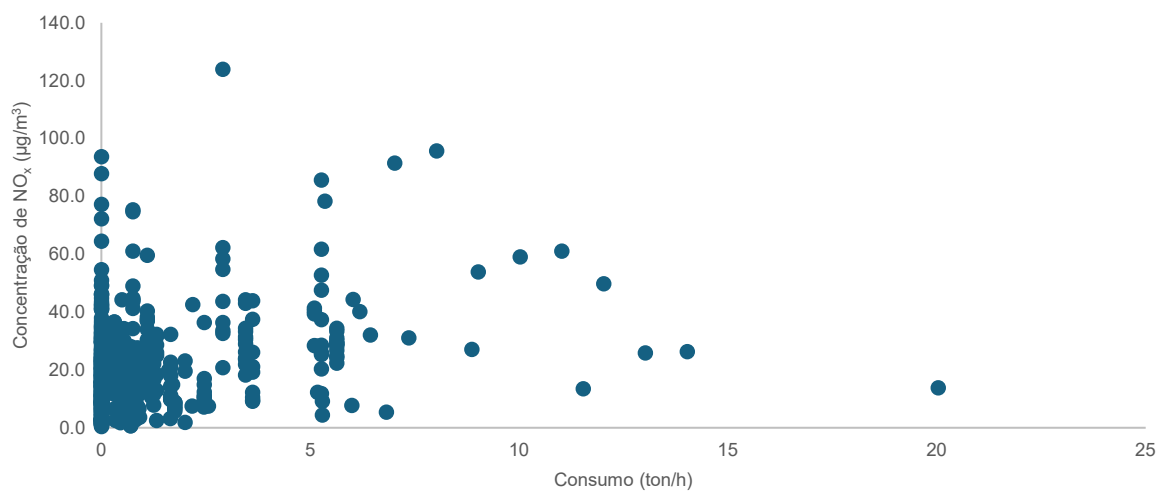
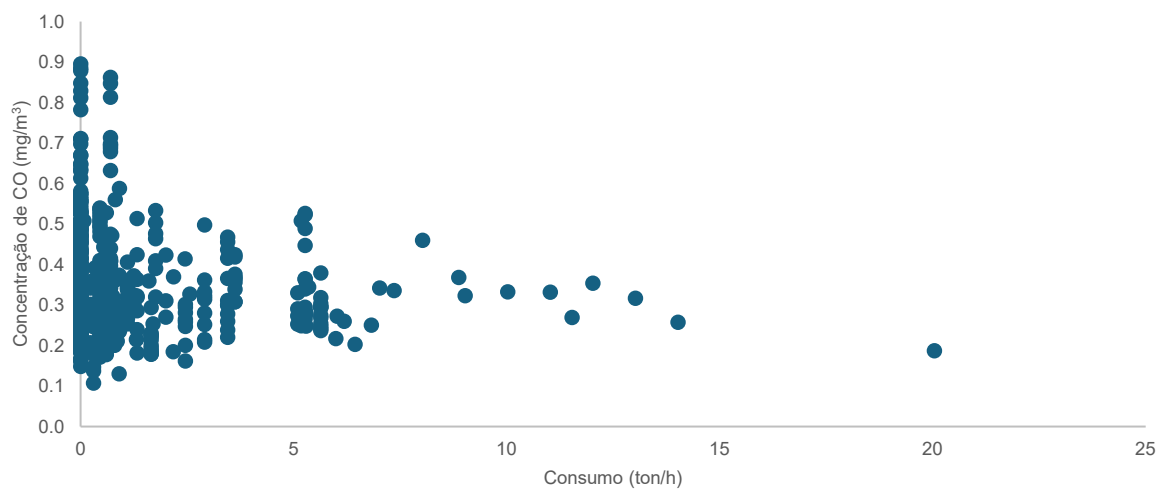


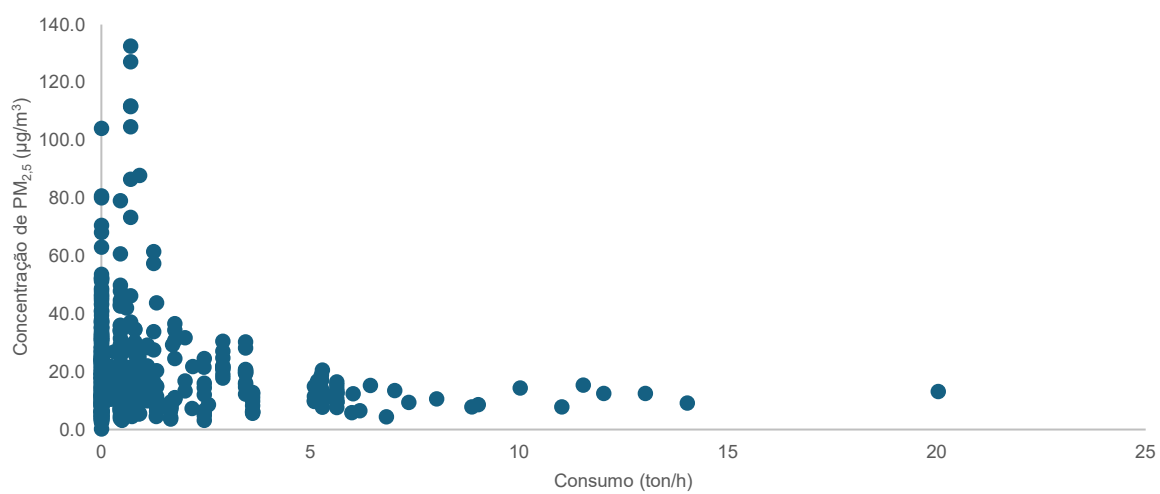
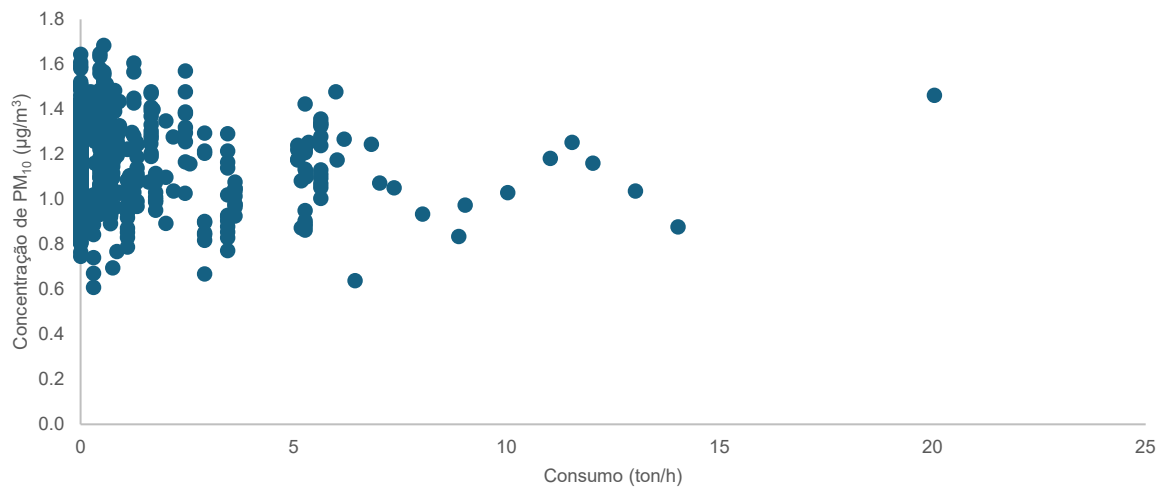


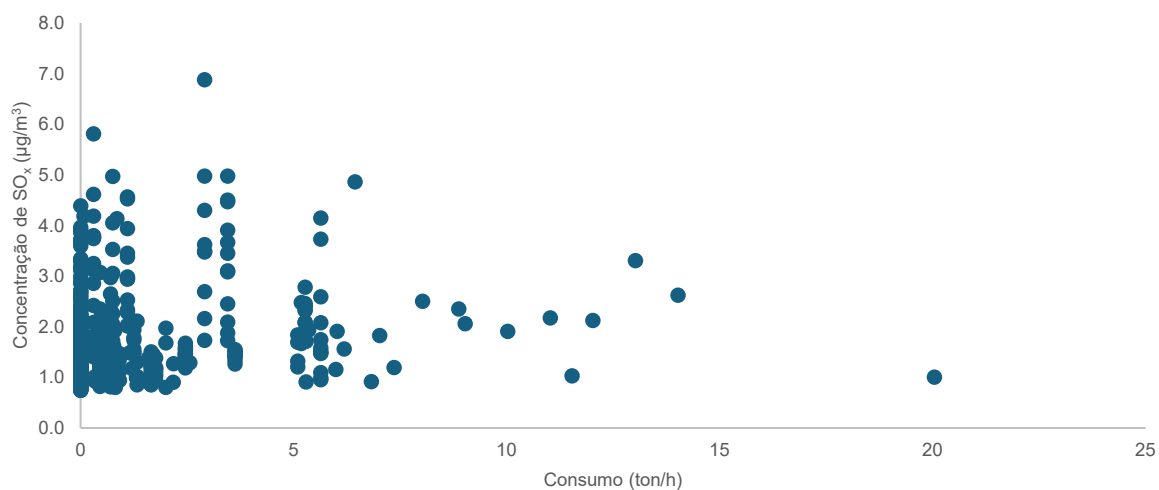
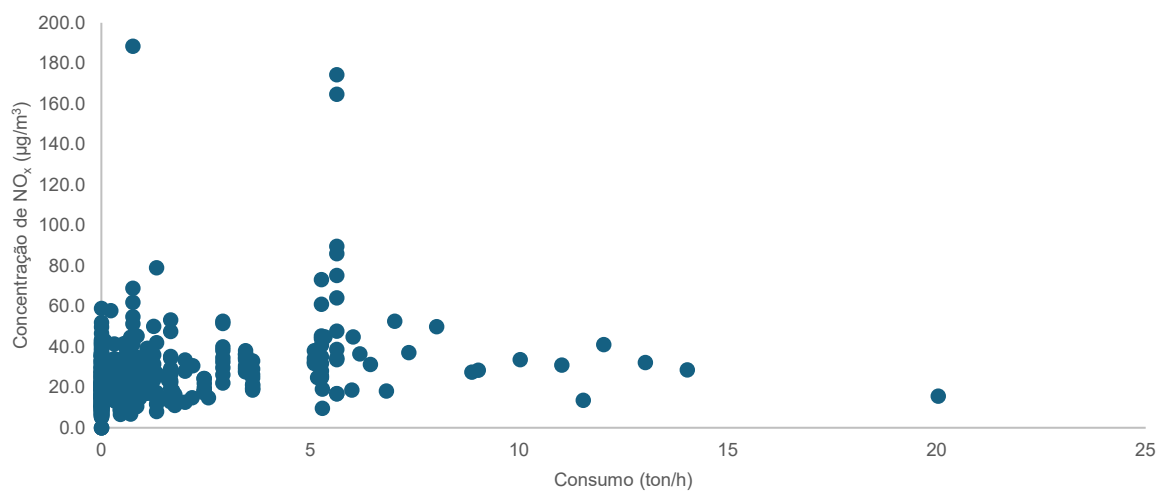
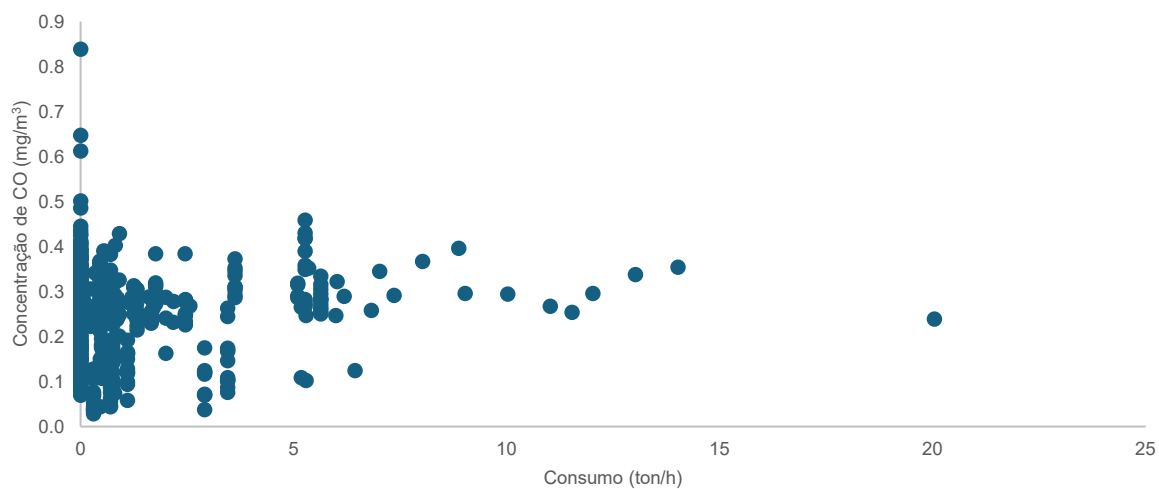
Anexo XLII – Dispersão no mês de junho para o sensor “P1-Móvel”

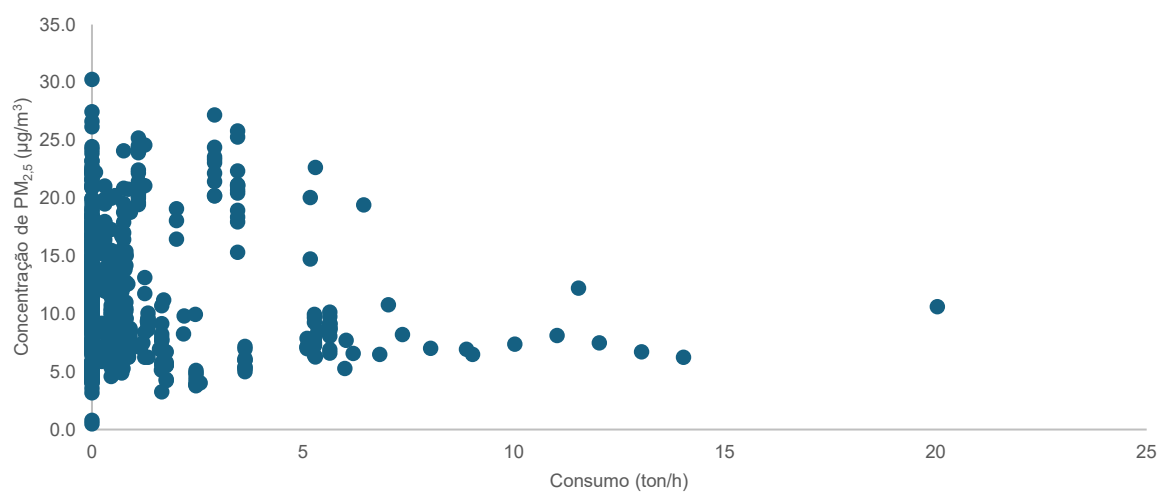
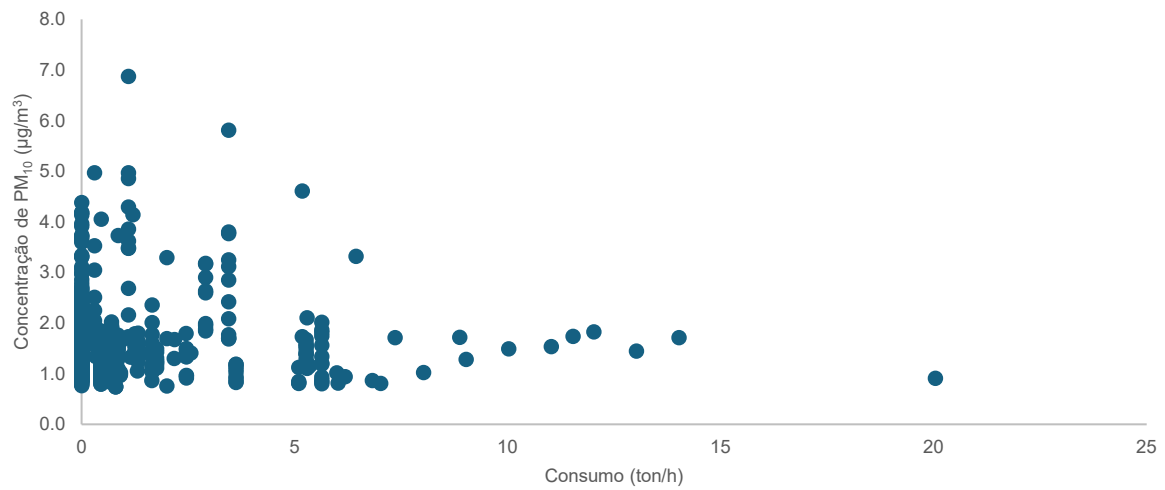




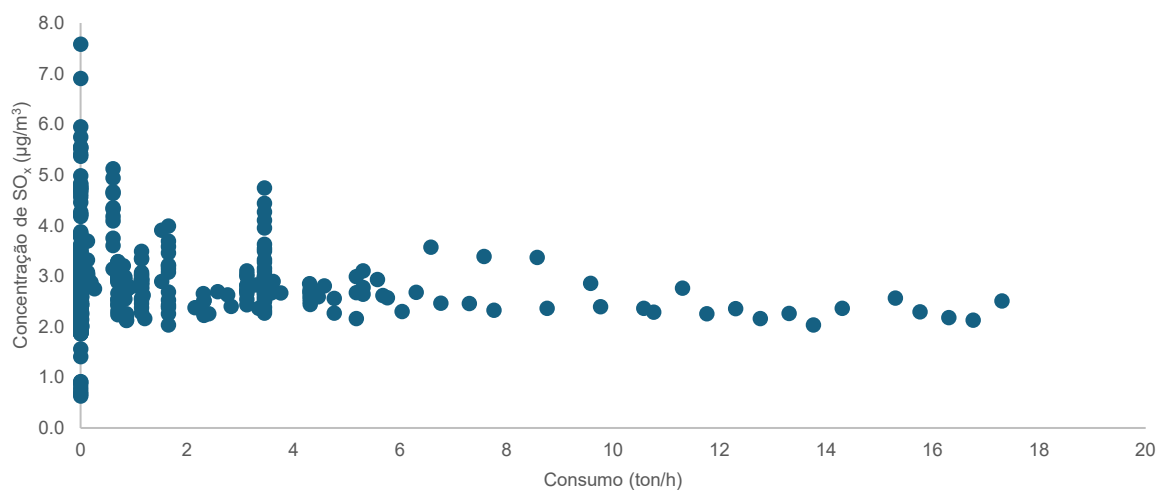
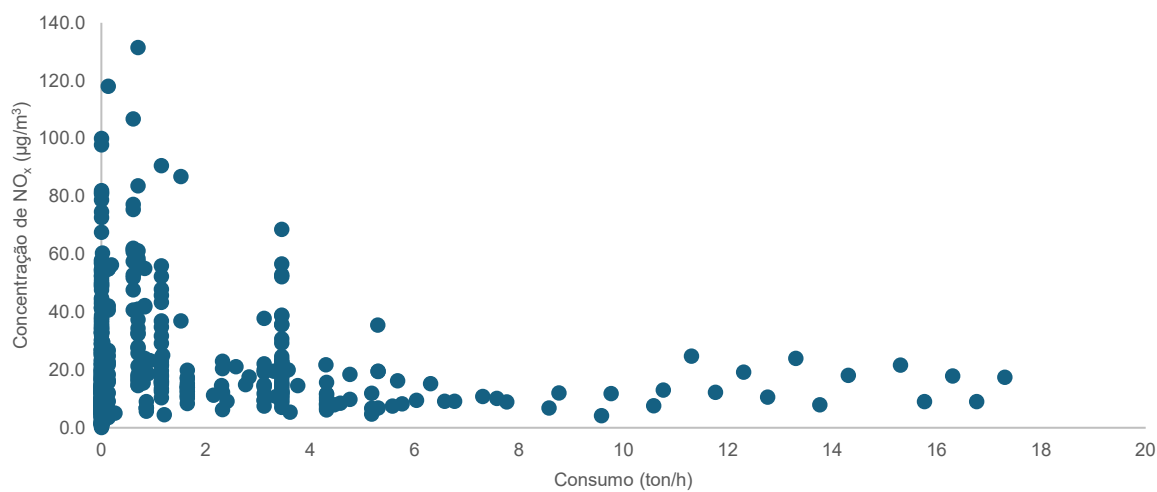
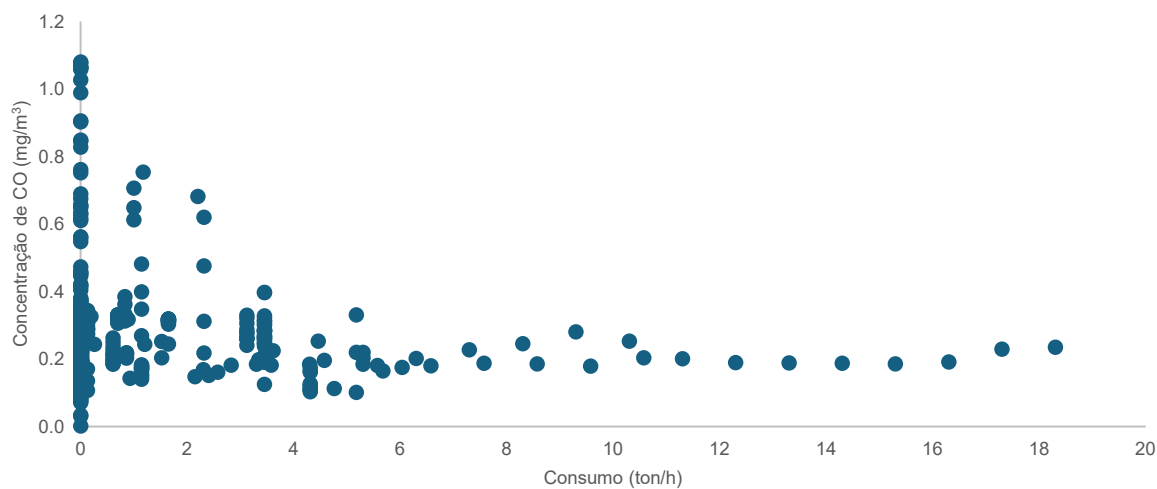
Anexo XLIII – Dispersão no mês de junho para o sensor “P2-Móvel”

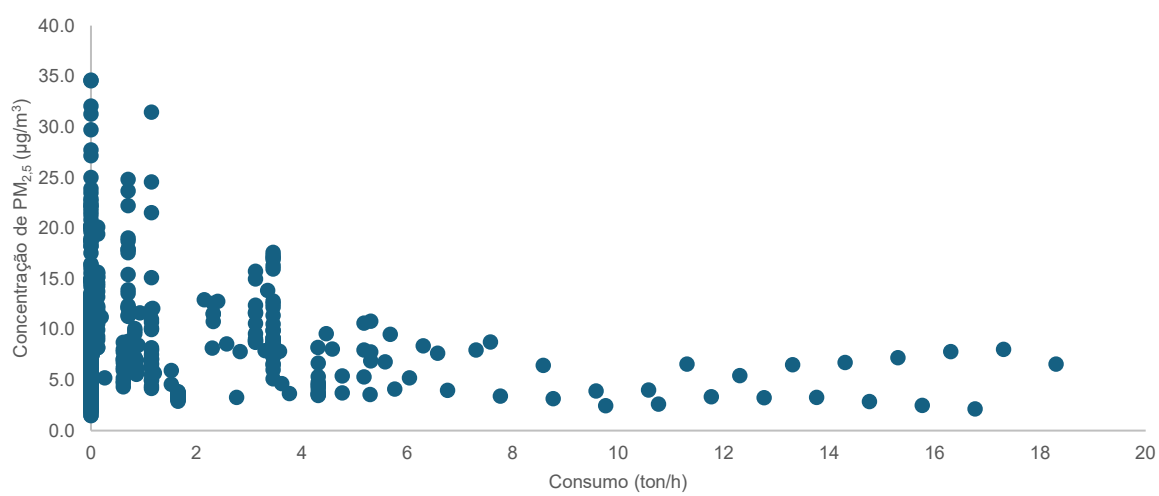
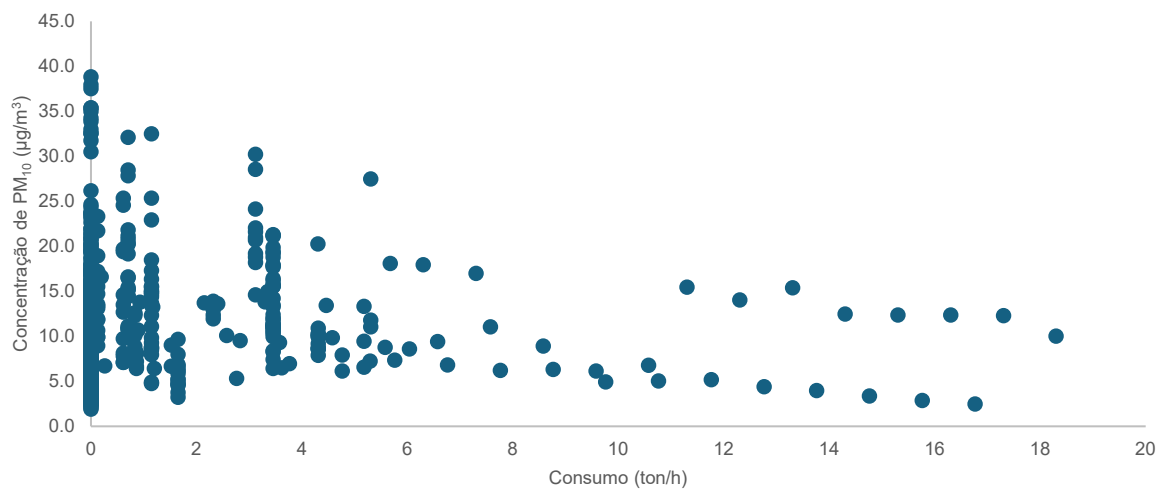


Anexo XLIV– Dispersão no mês de junho para o sensor “P3-Móvel”

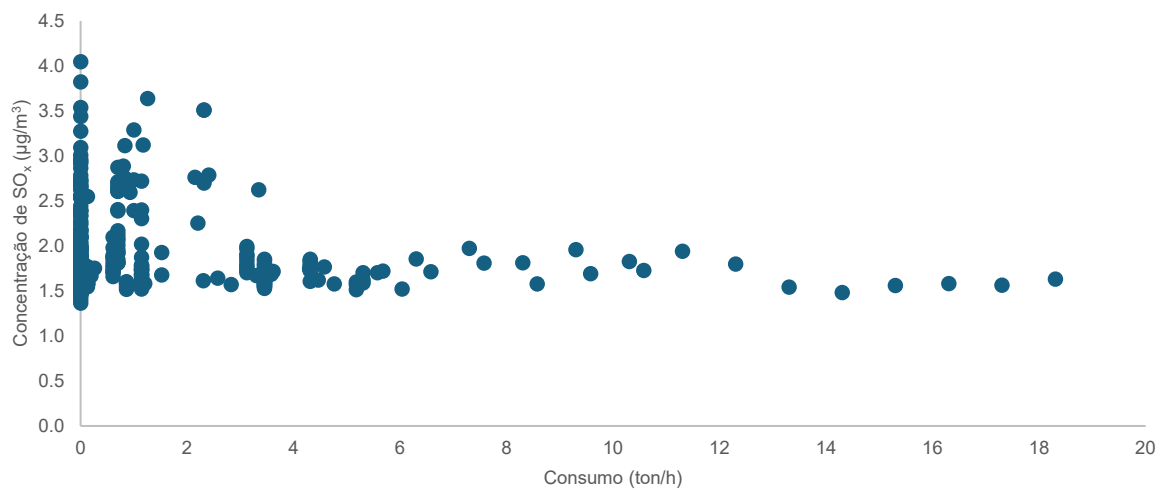
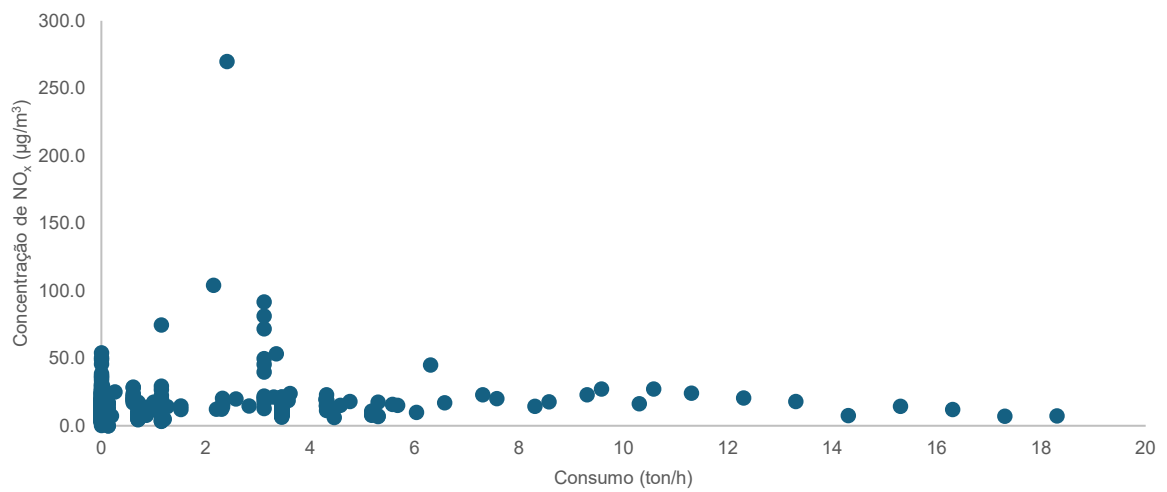
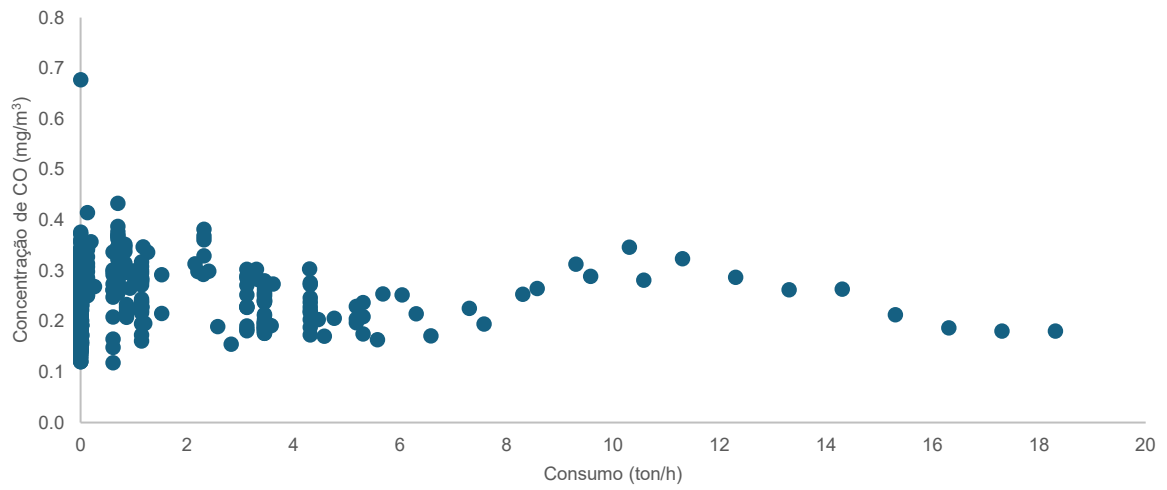


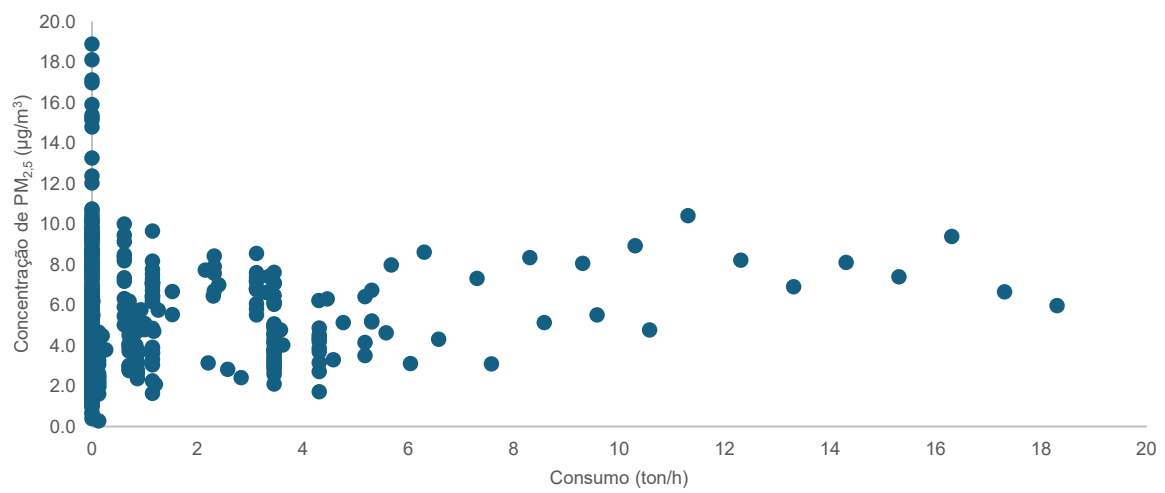
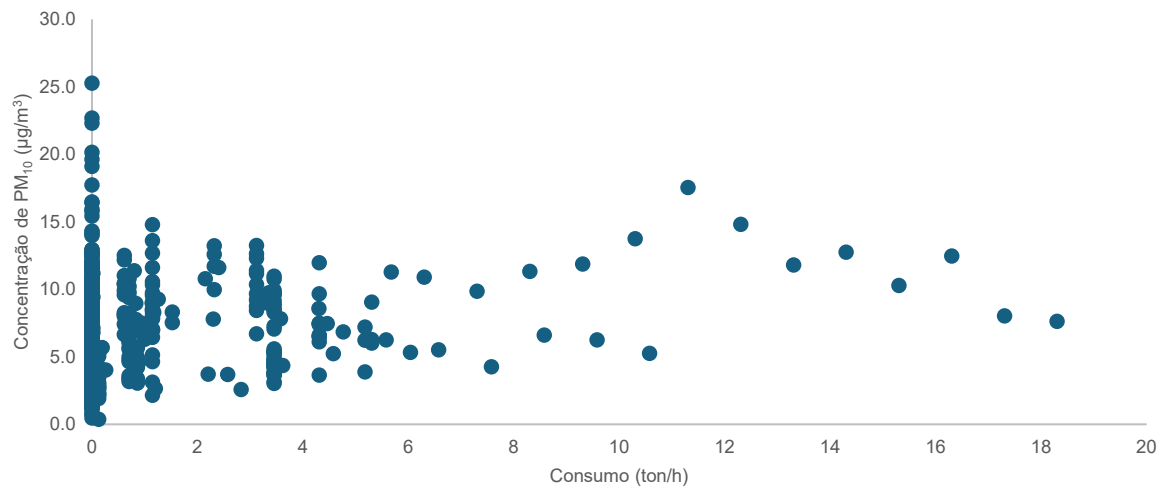
Anexo XLV– Dispersão no mês de julho para o sensor “Estação-Física”



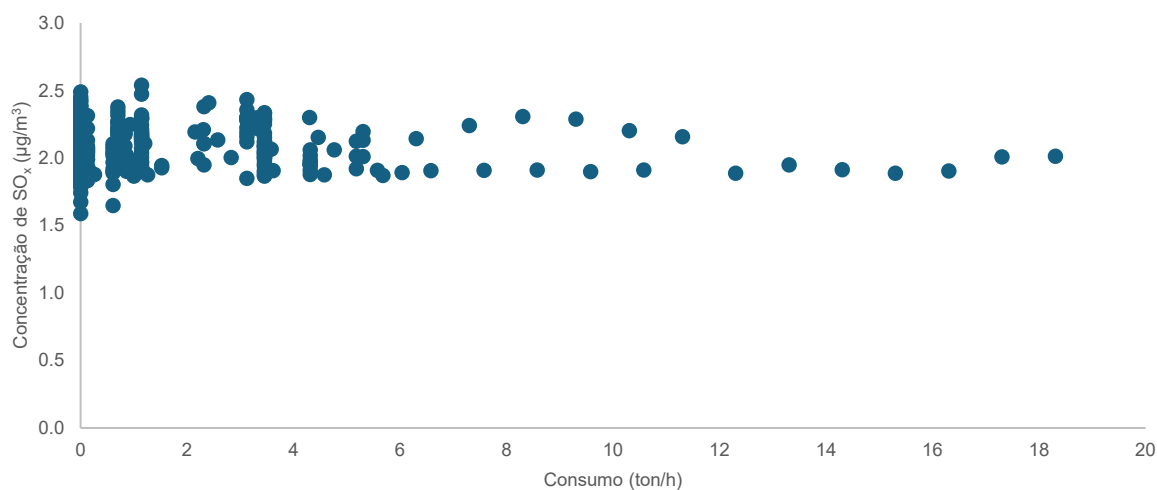
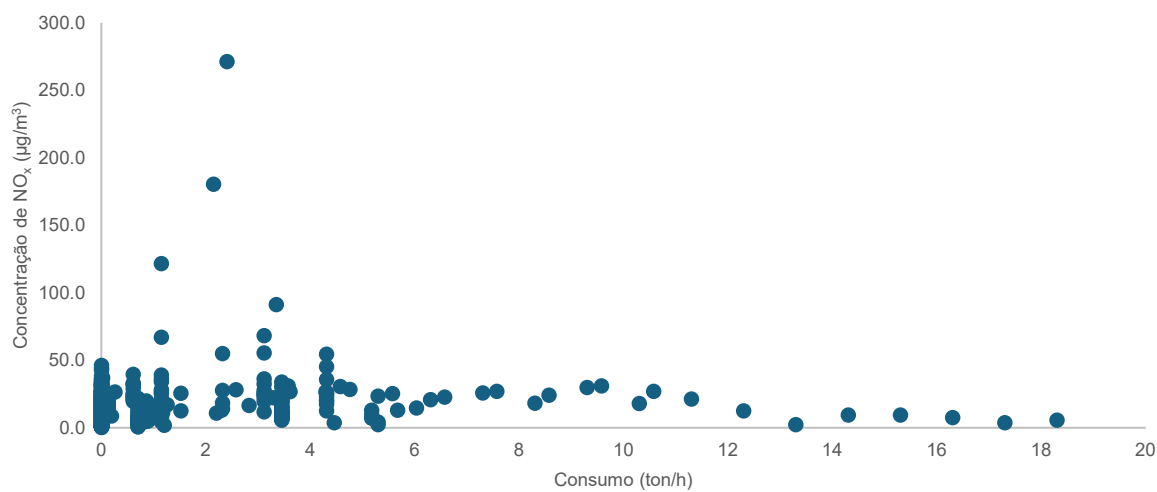
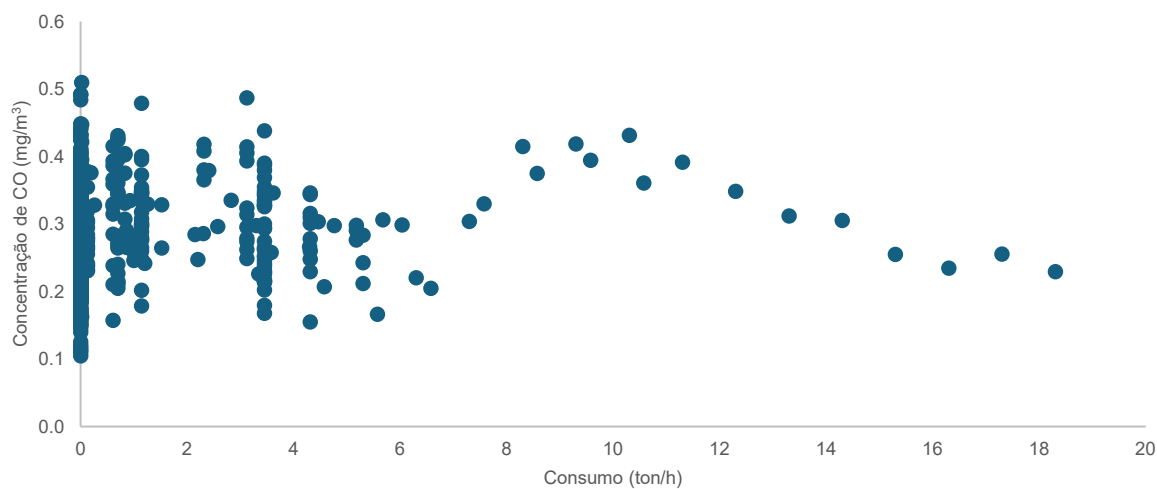


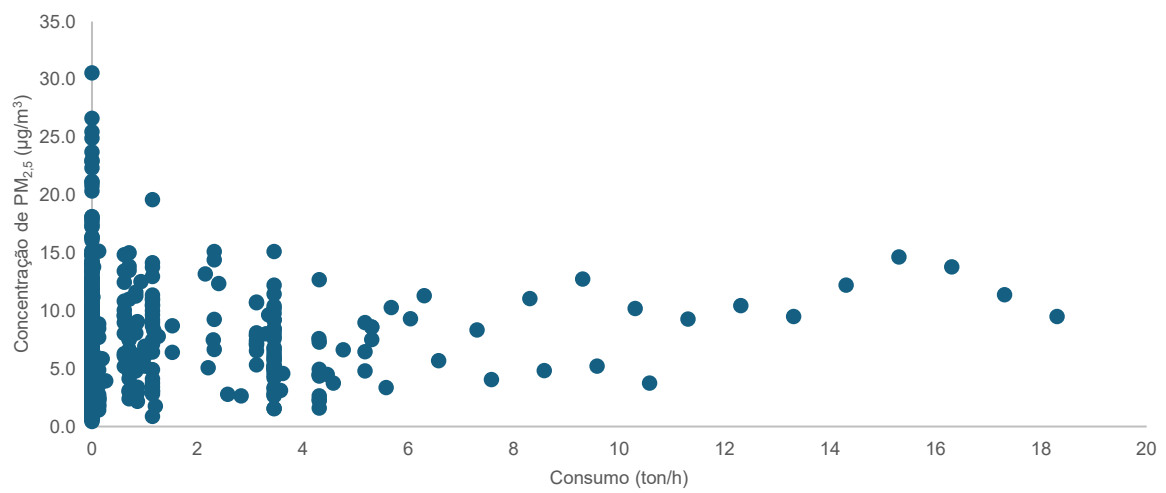
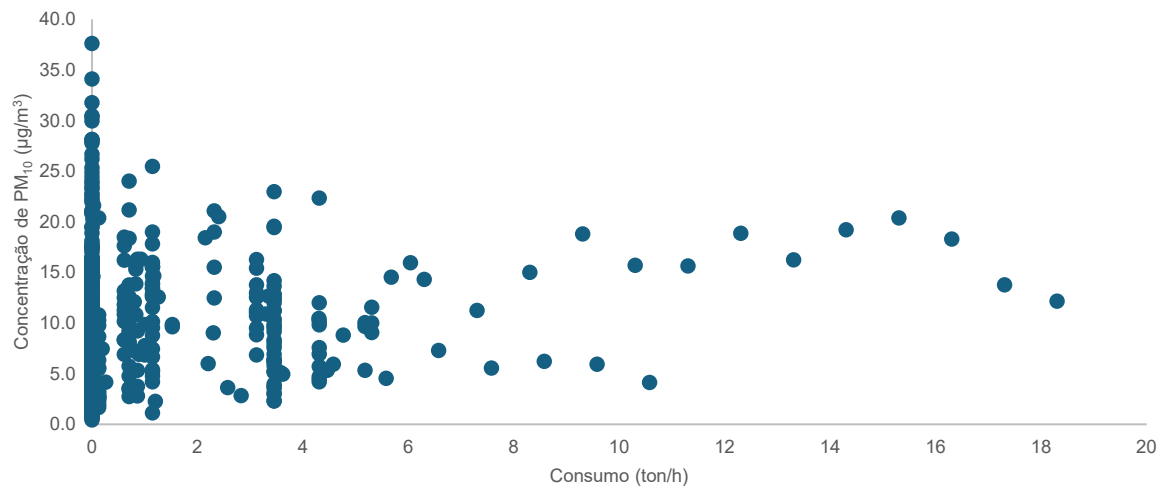
Anexo XLVI – Dispersão no mês de julho para o sensor “P1-Móvel”



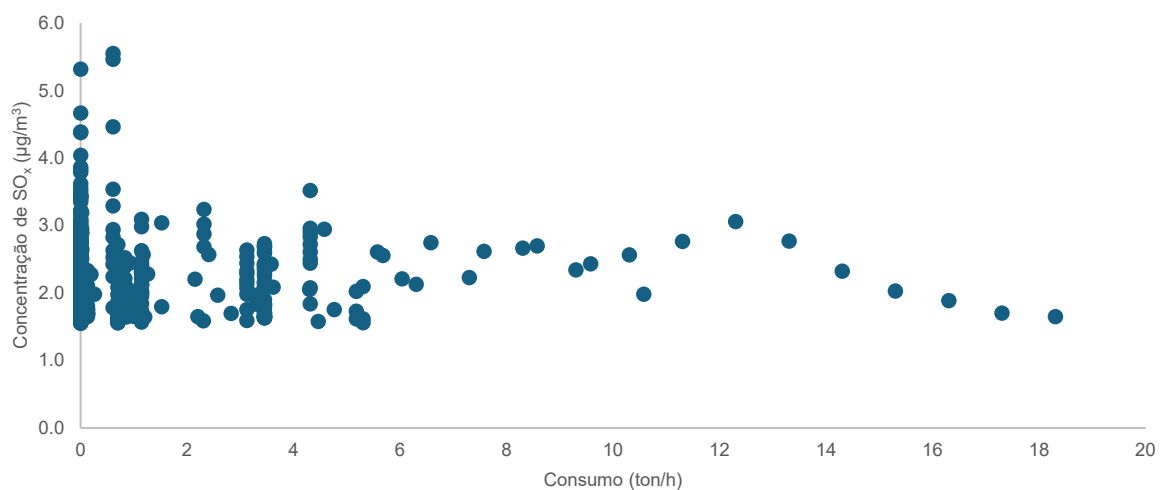
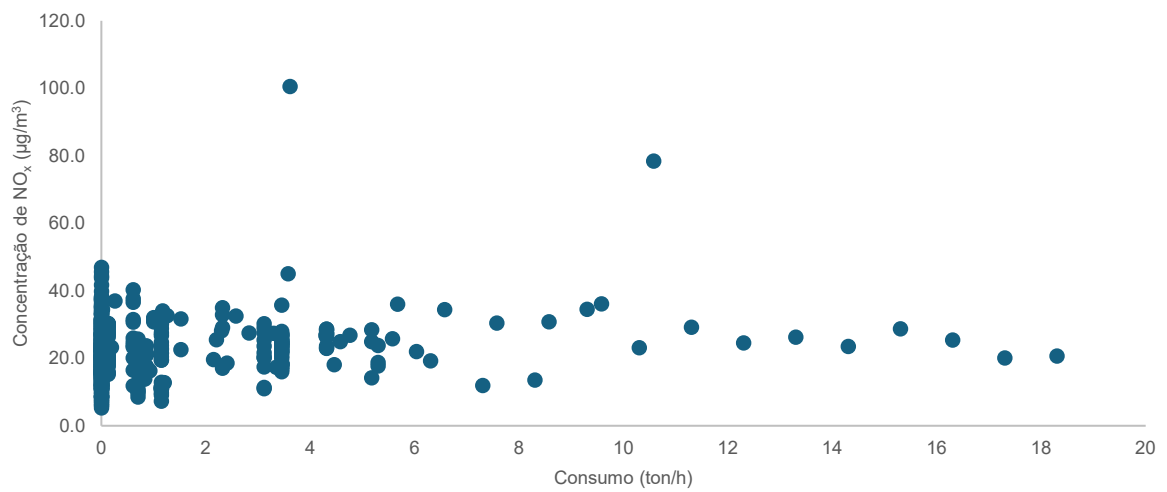
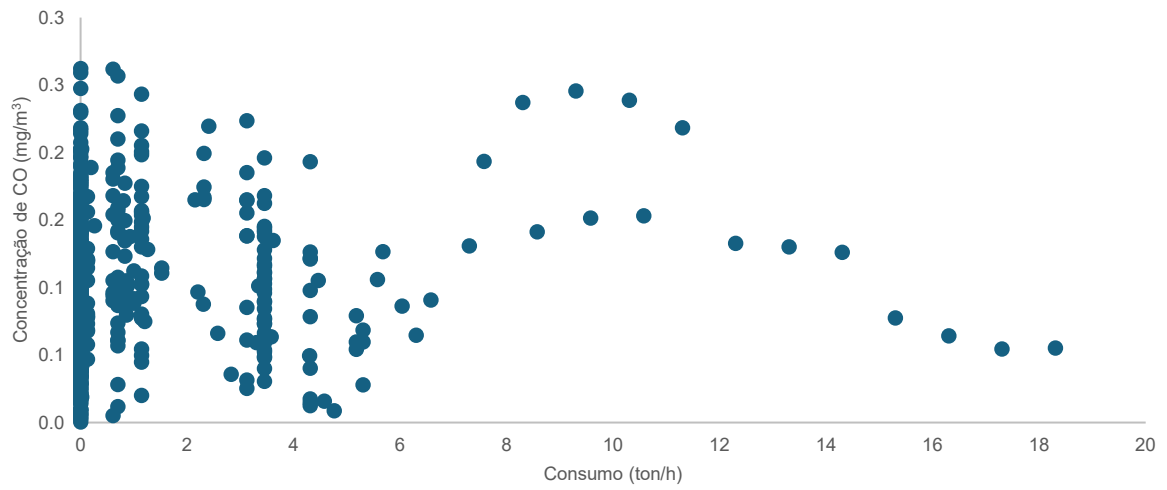


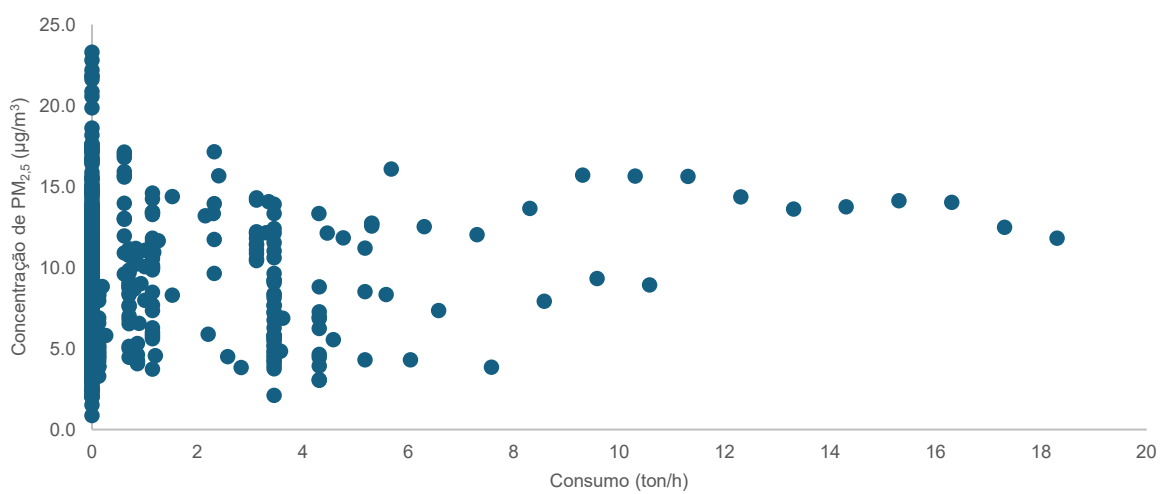
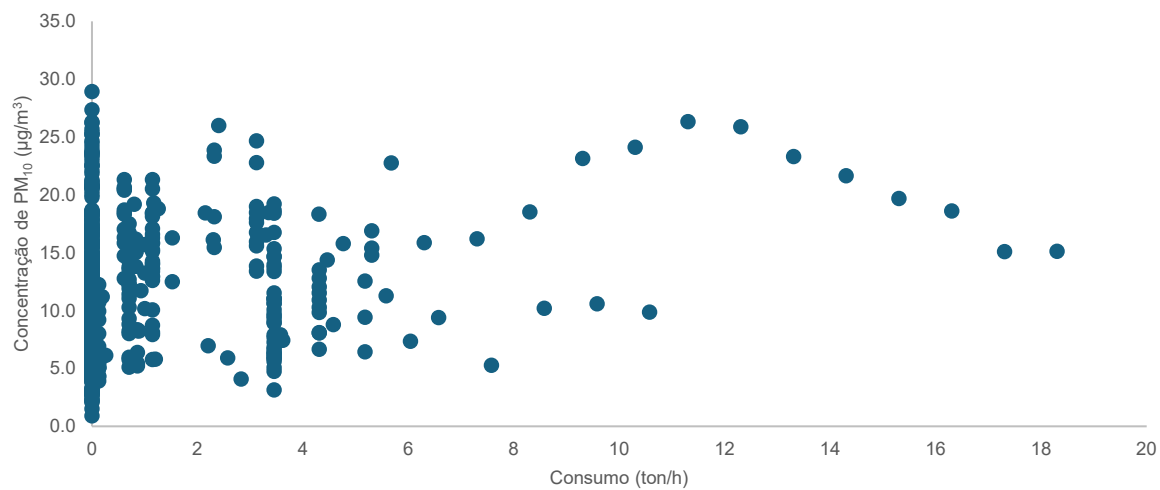
Anexo XLVII– Dispersão no mês de julho para o sensor “P2-Móvel”



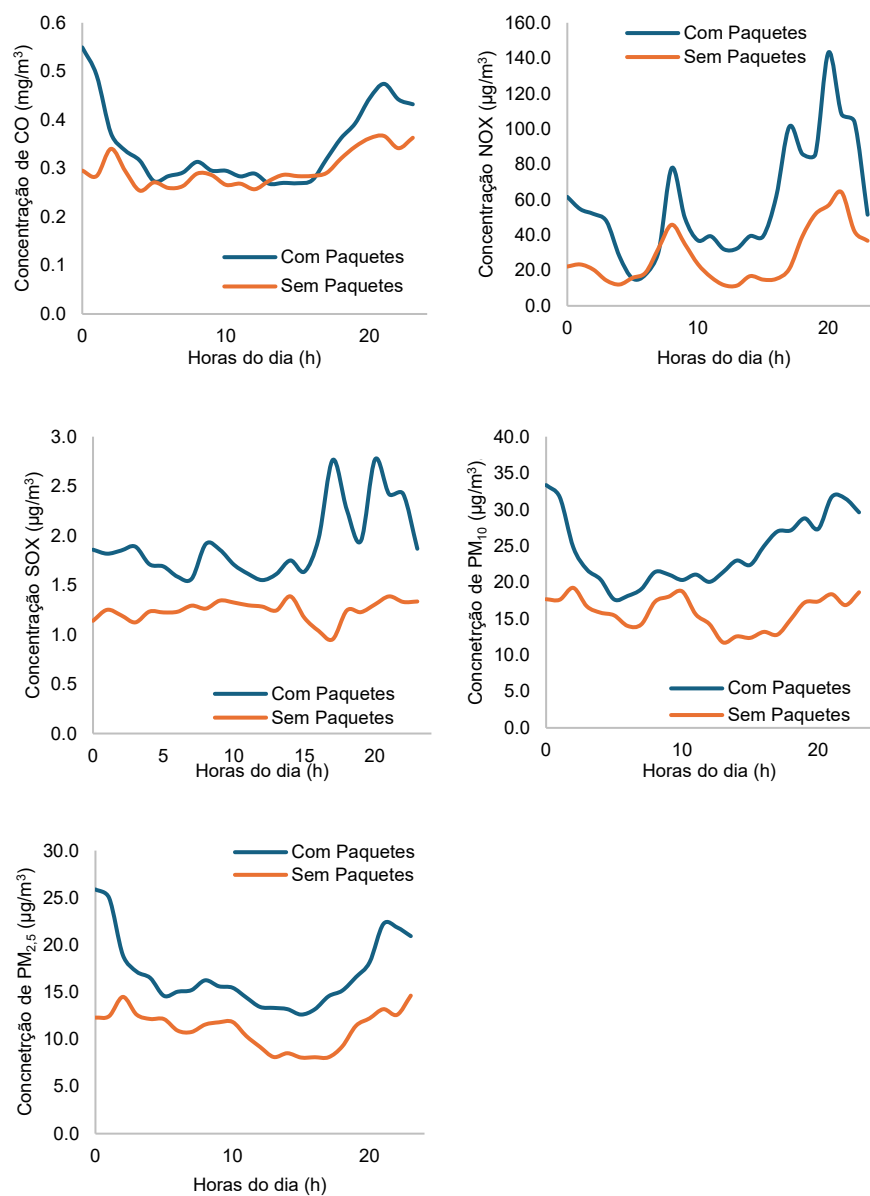


Anexo XLVIII– Dispersão no mês de julho para o sensor “P3-Móvel”

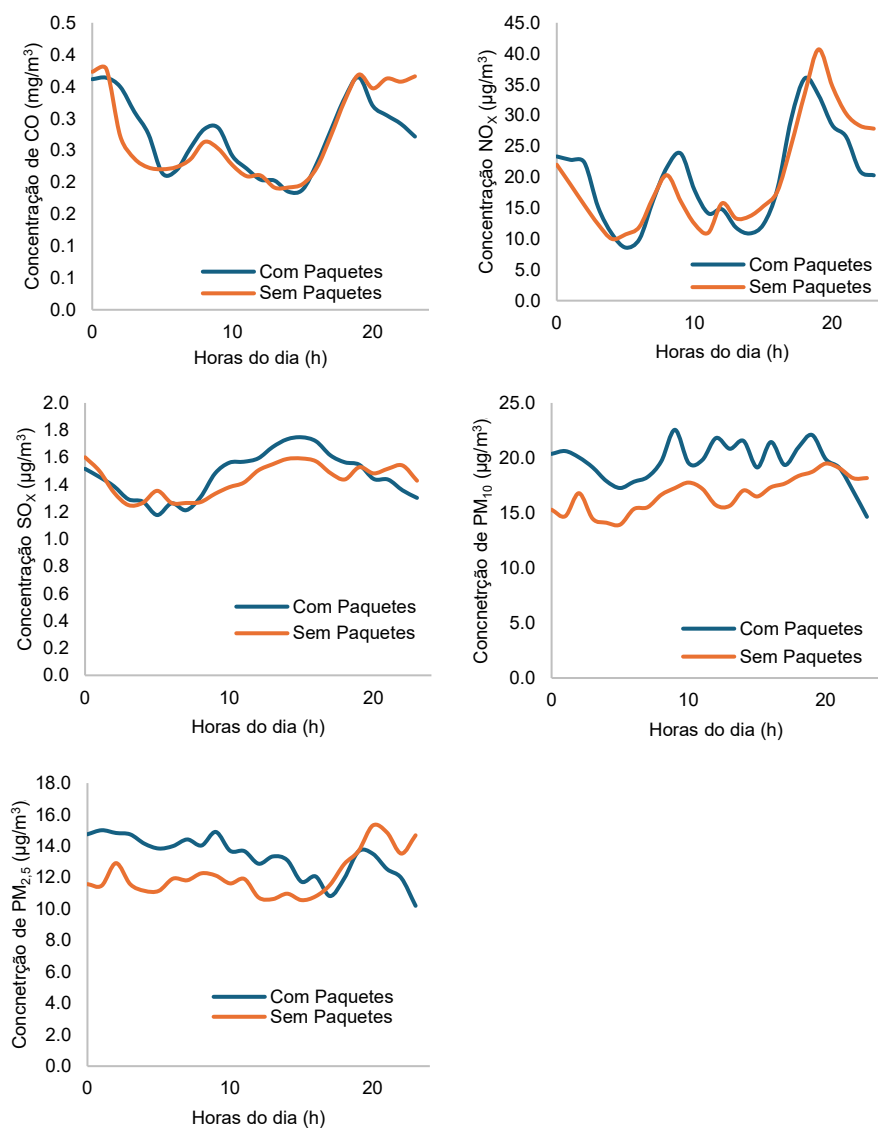




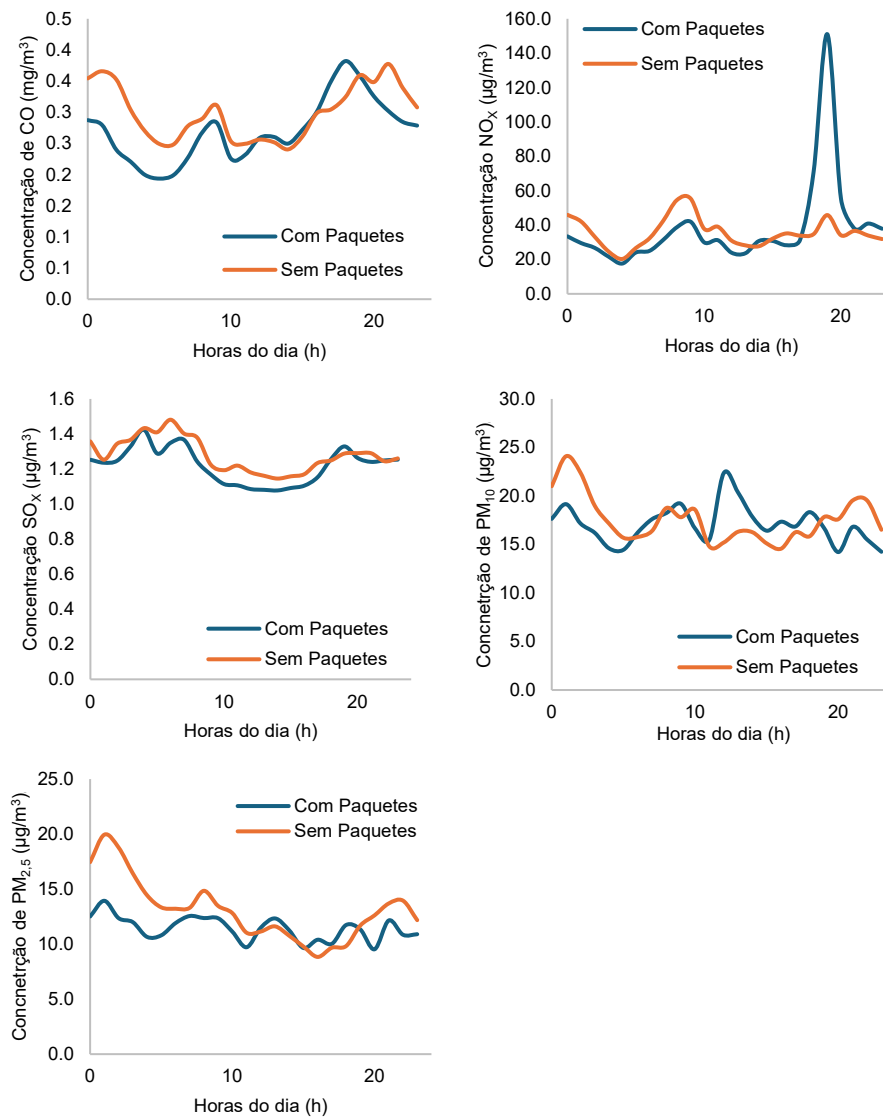
Anexo XLIX– Variação média da concentração dos poluentes em dias de semana de fevereiro na “Estação-Física”



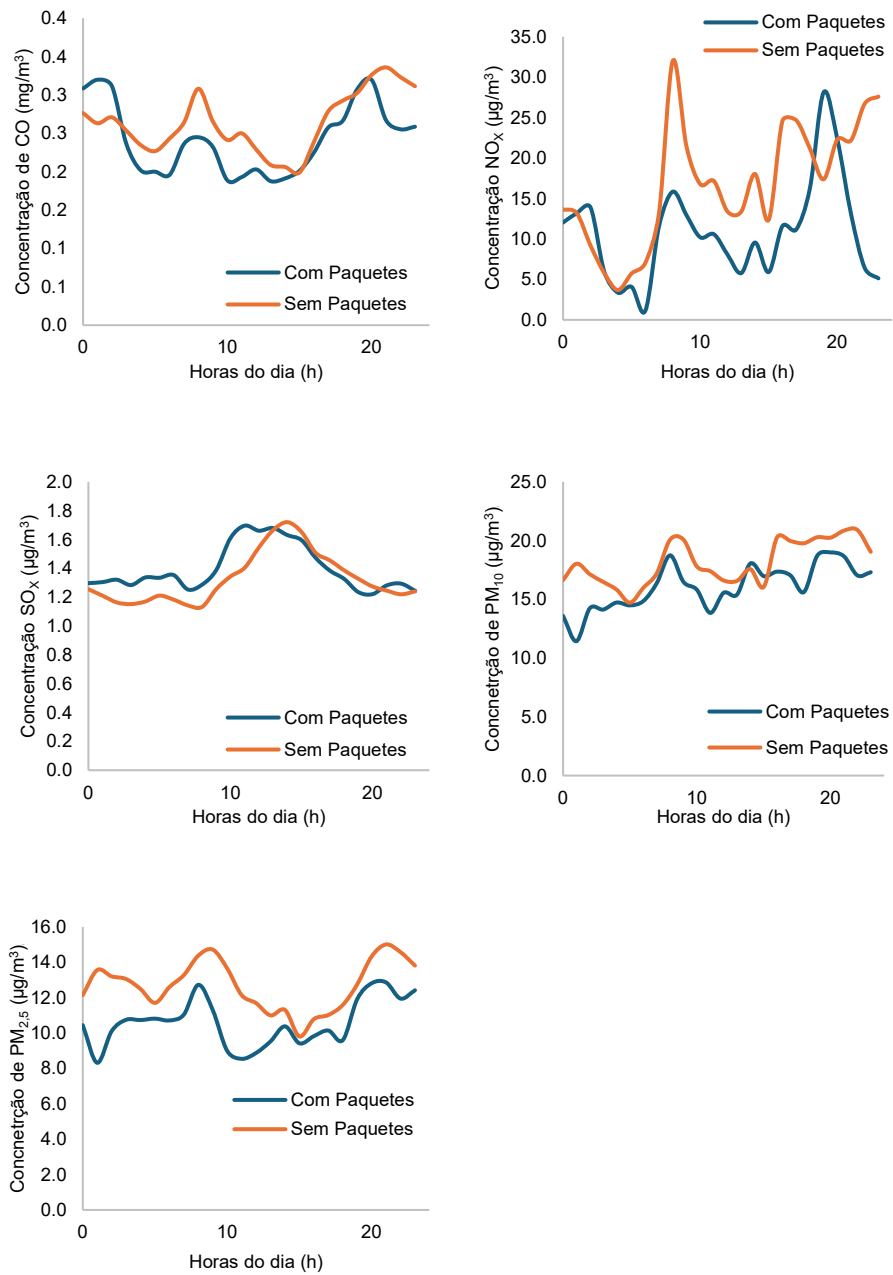
Anexo L – Variação média da concentração dos poluentes em dias de semana de fevereiro na “P1-Móvel”



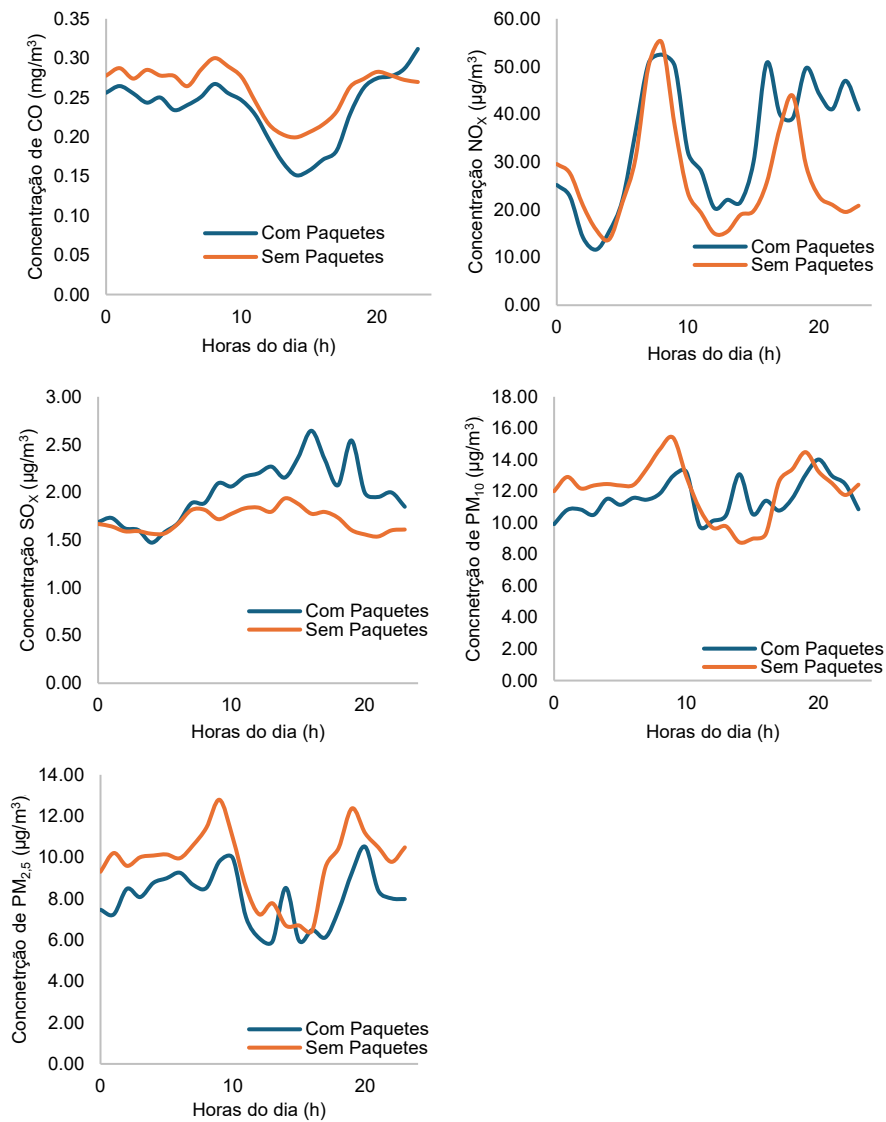
Anexo LI – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de fevereiro na “P2-Móvel”



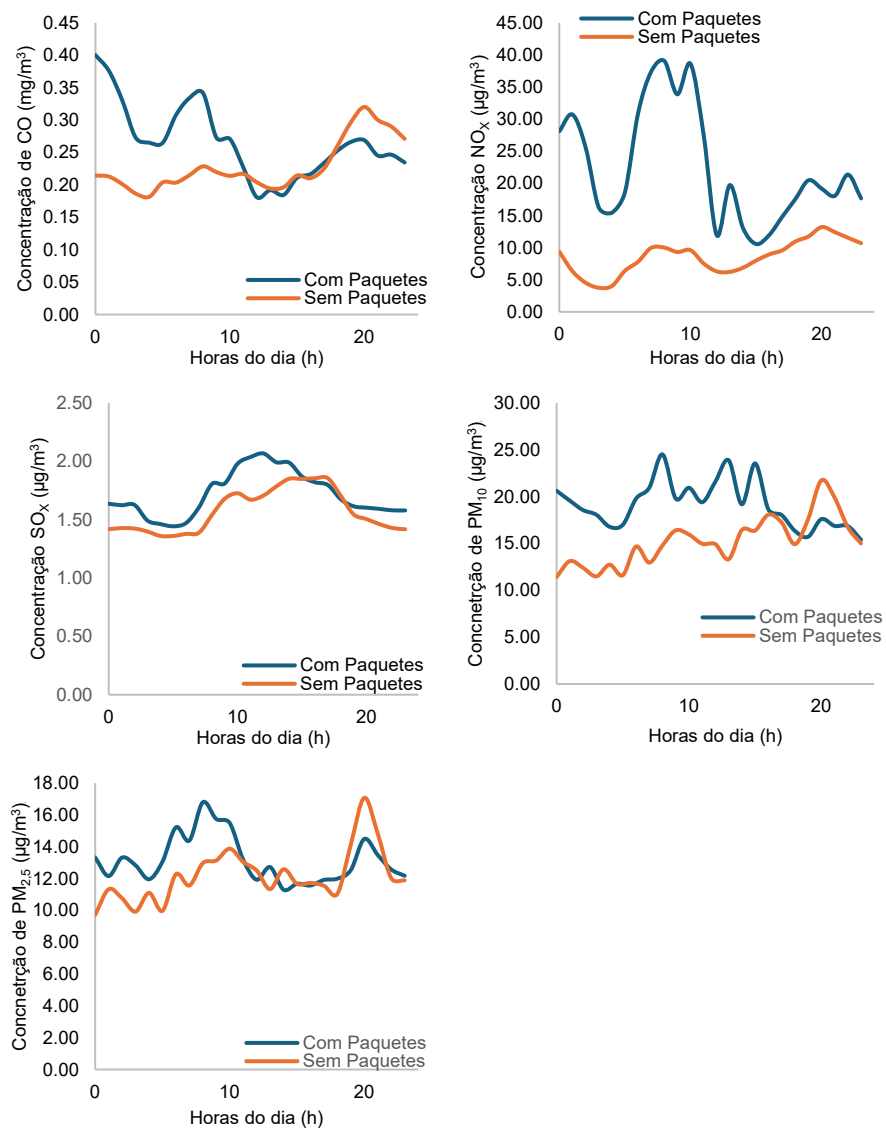
Anexo LII– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de fevereiro na “P3-Móvel”



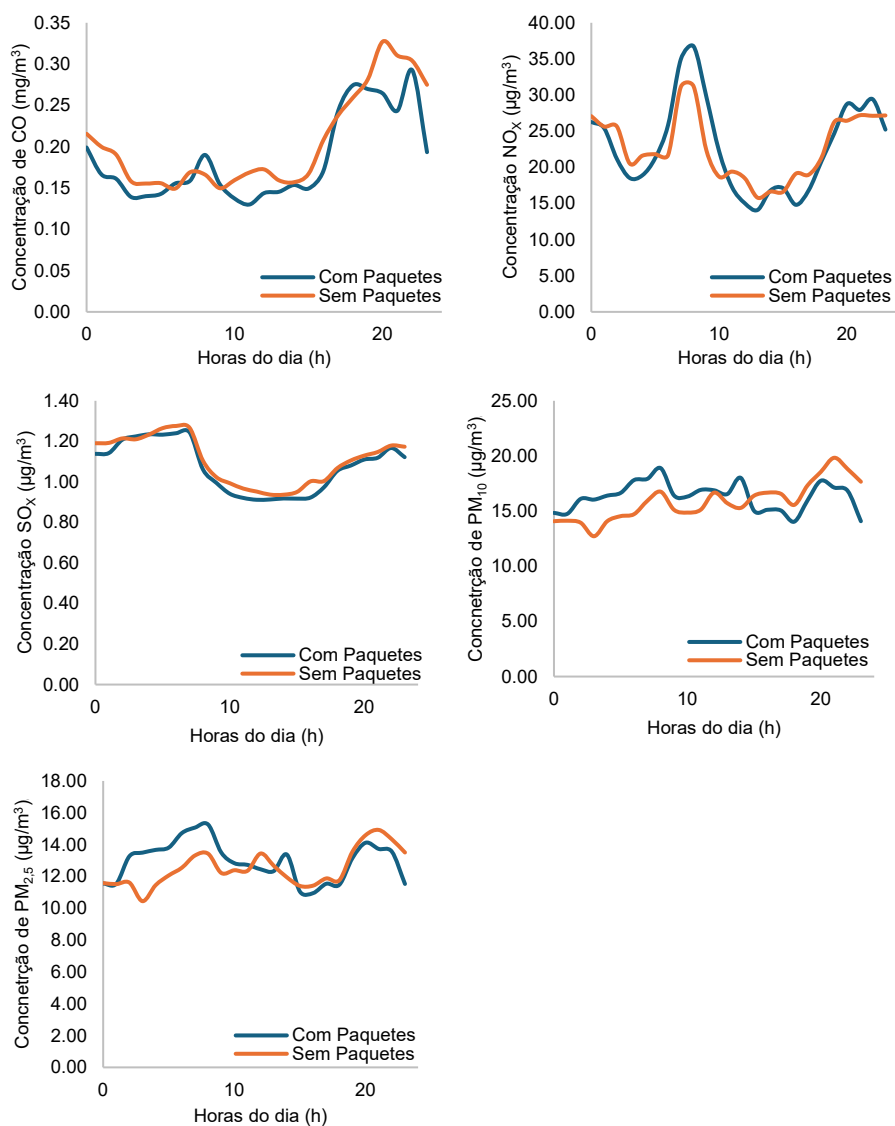
Anexo LIII– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de março na “Estação-Física”



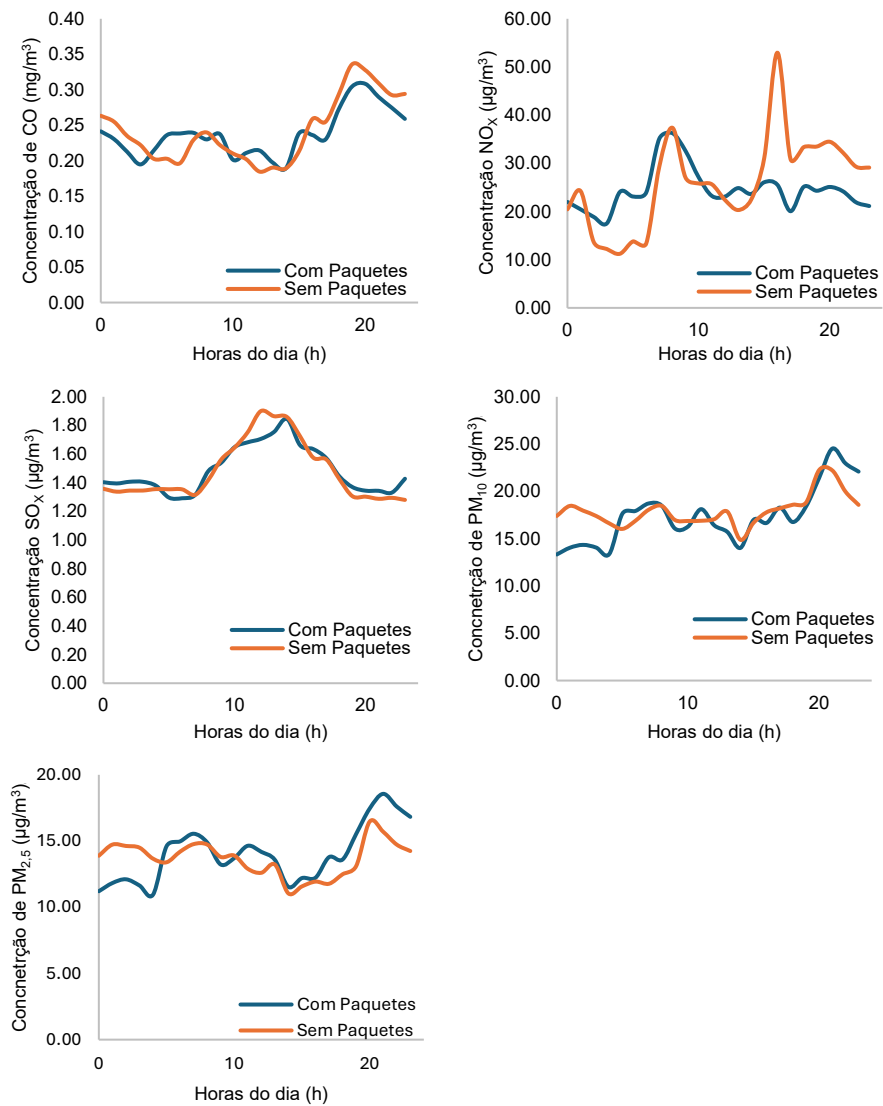
Anexo LIV – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de março na “P1-Móvel”

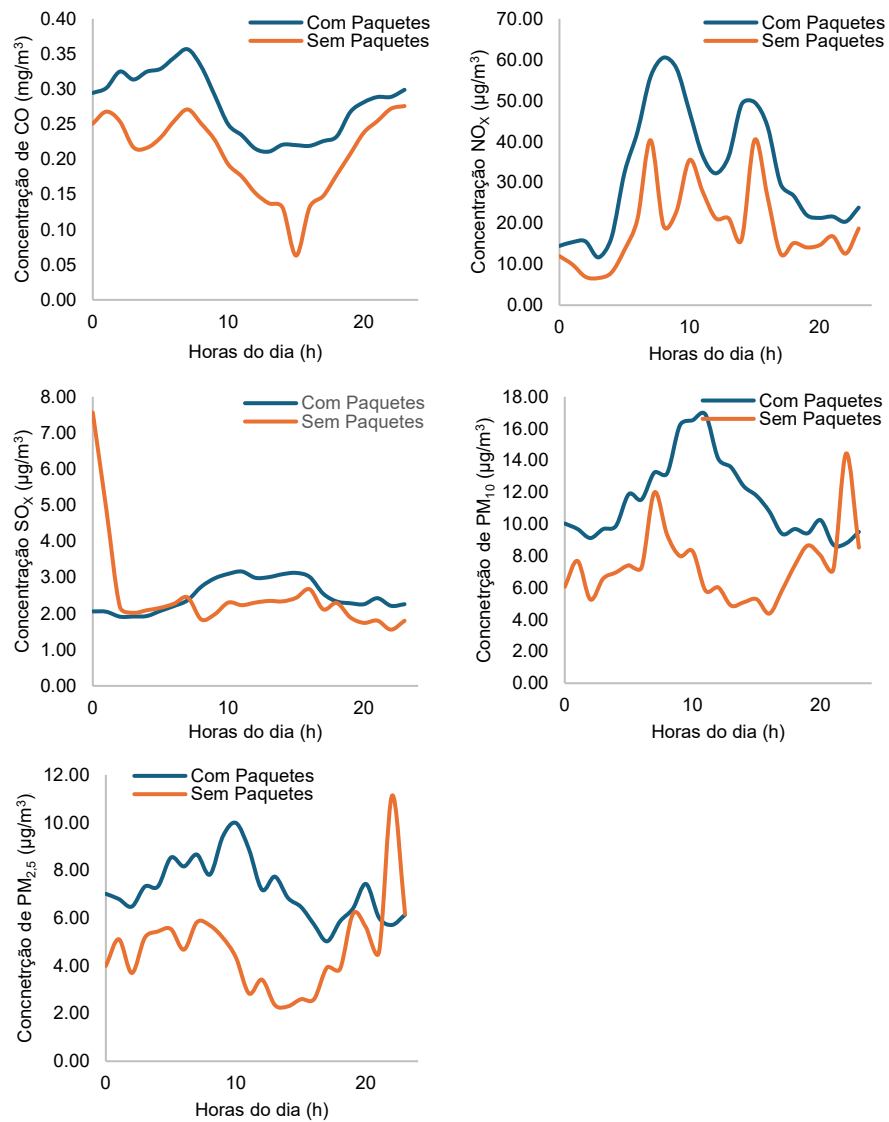


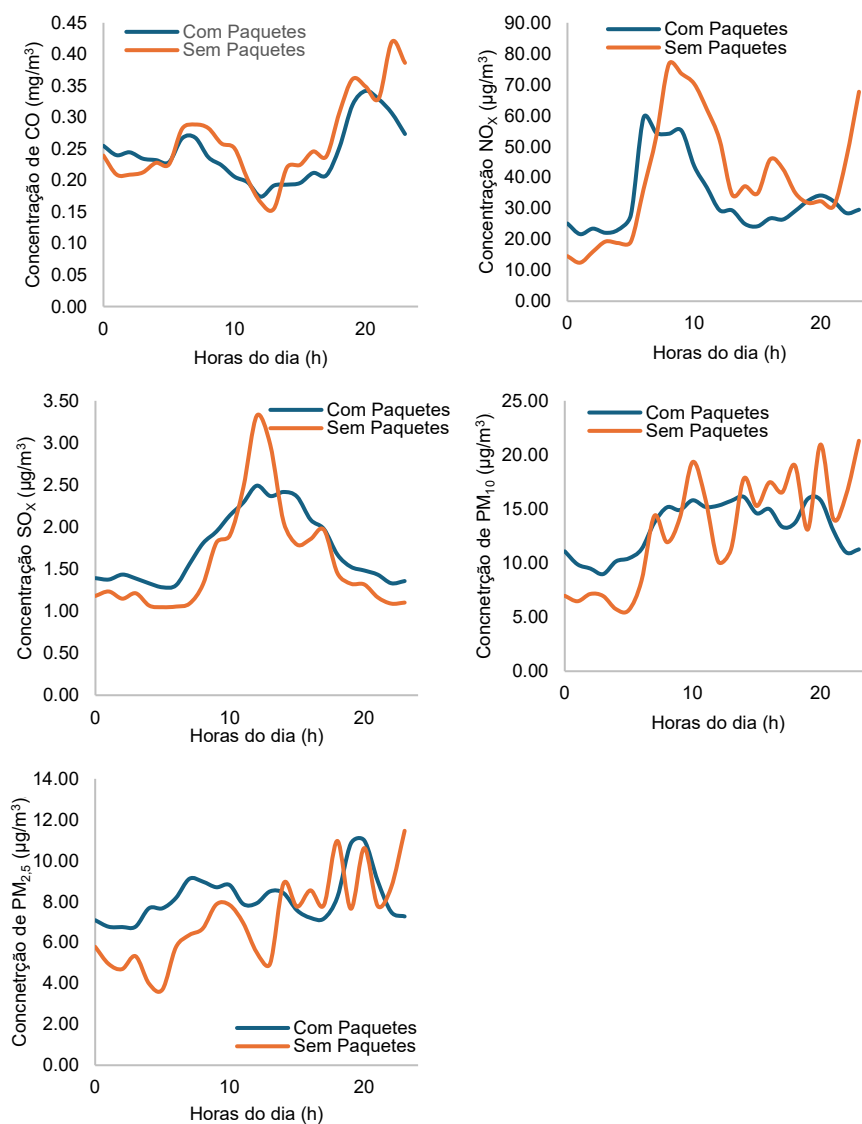
Anexo LV – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de março na “P2-Móvel”



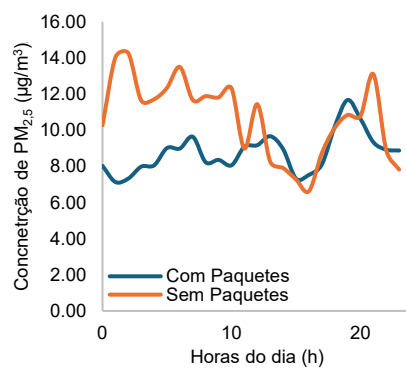
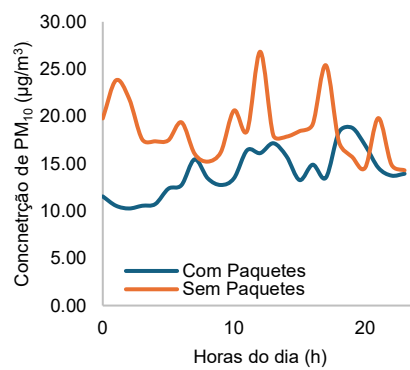
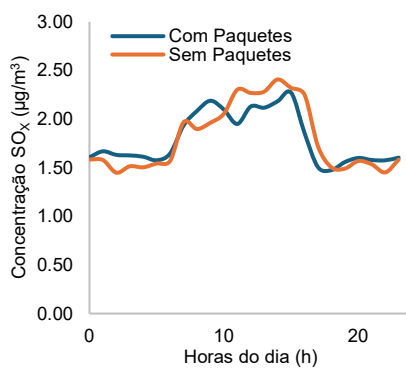
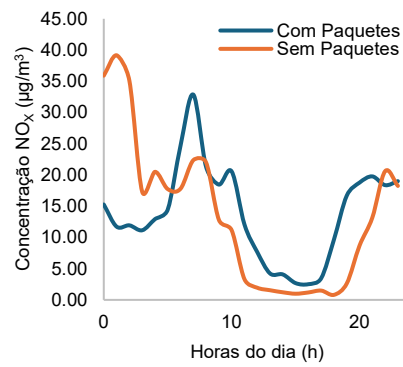
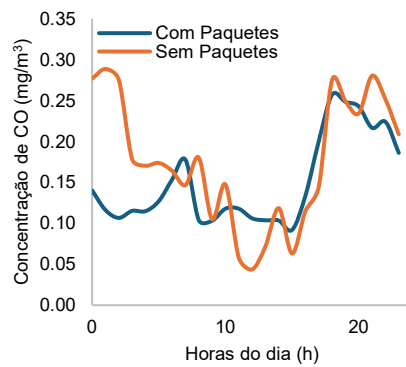
Anexo LVI – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de março na “P3-Móvel”



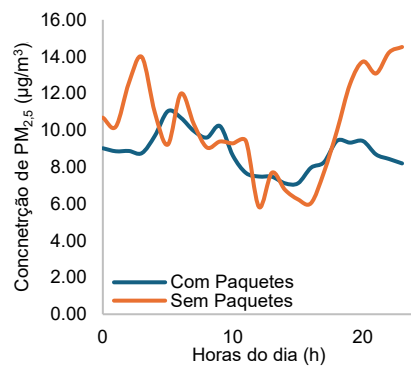
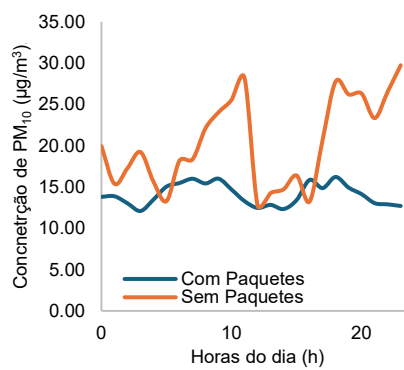
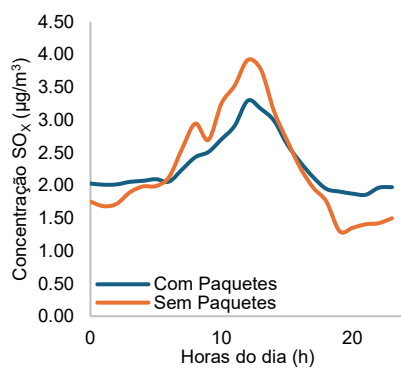
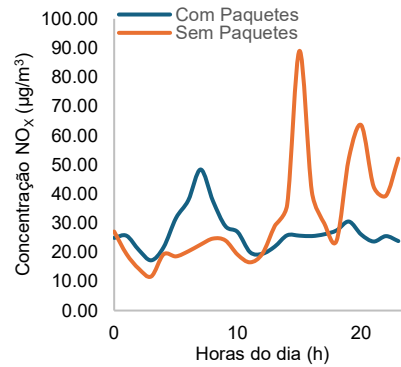
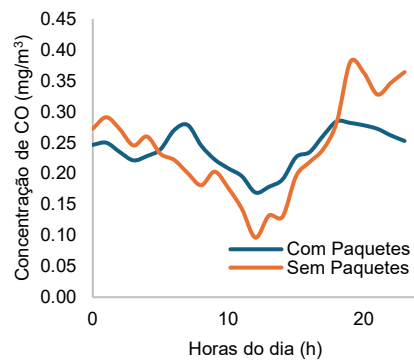
Anexo LVII – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de abril na “Estação-Física”

Anexo LVIII– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de abril na “P1-Móvel”

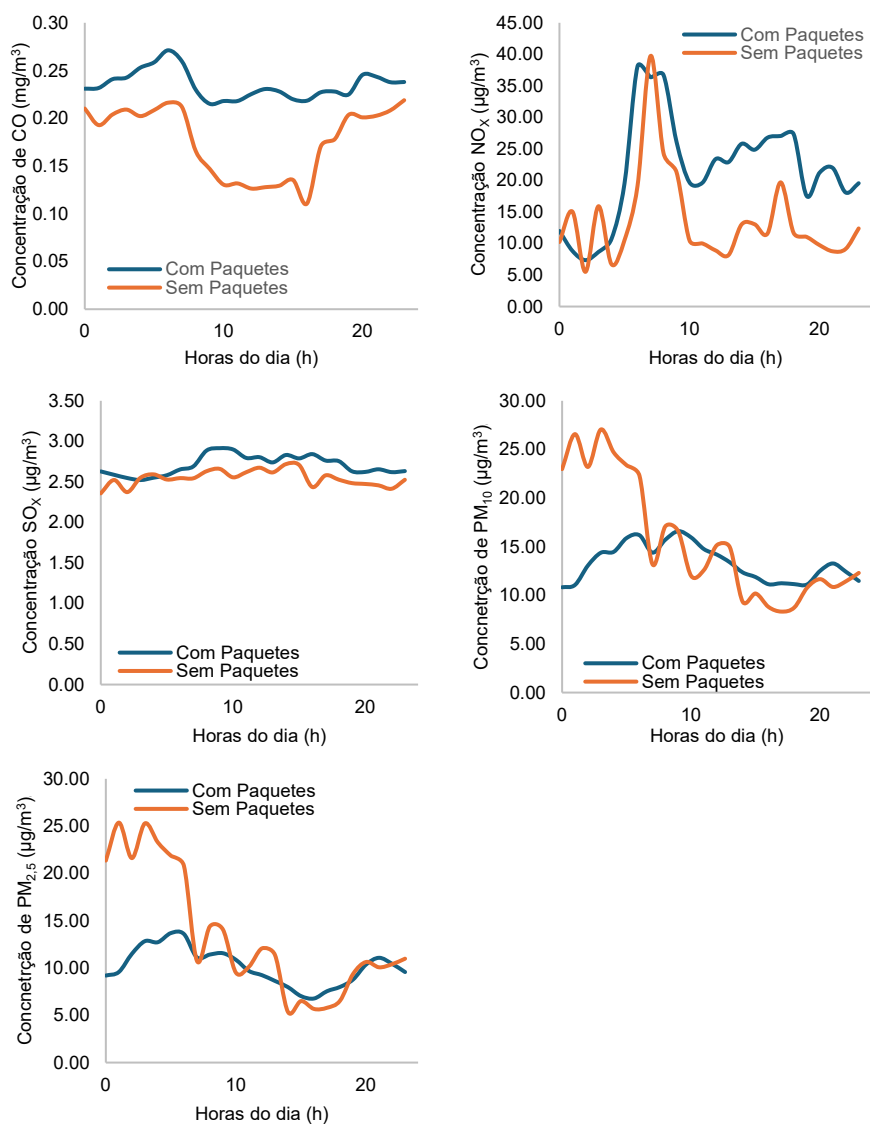
Anexo LIX– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de abril na “P2-Móvel”

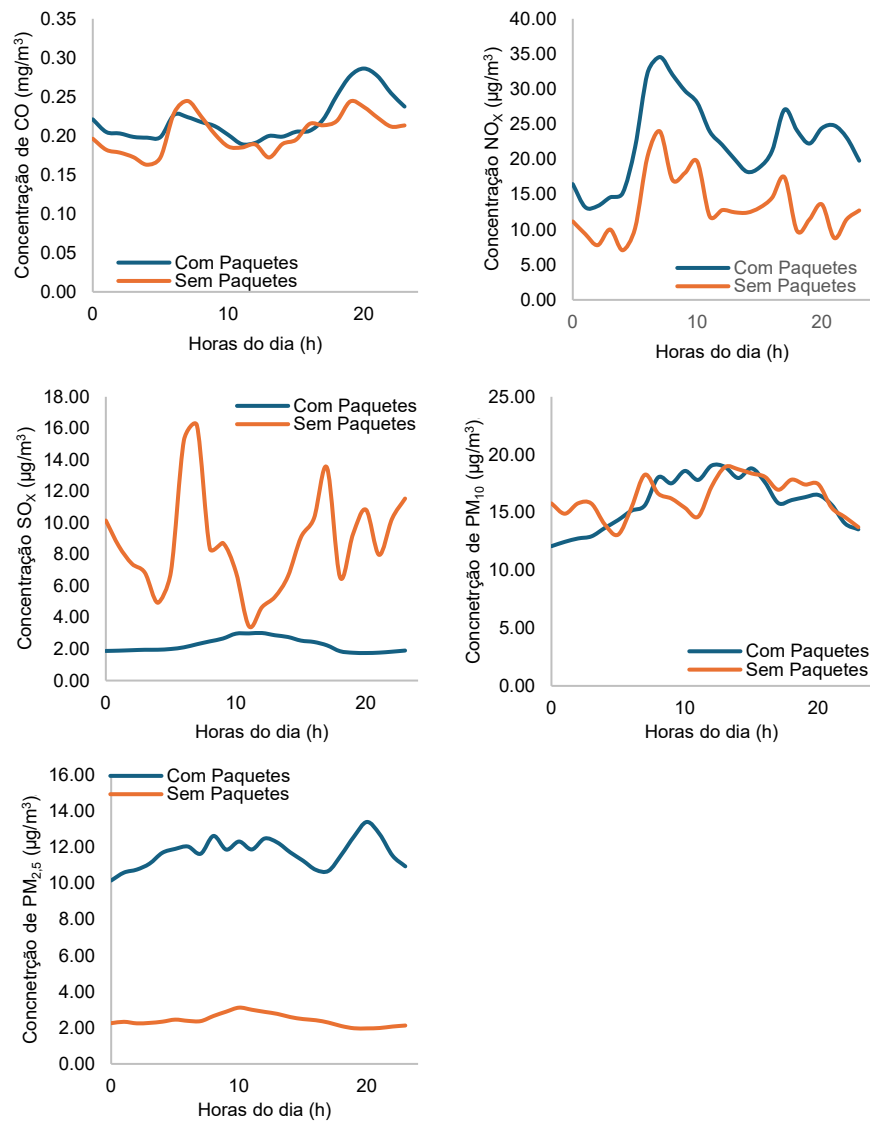


Anexo LX – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de março na “P3-Móvel”

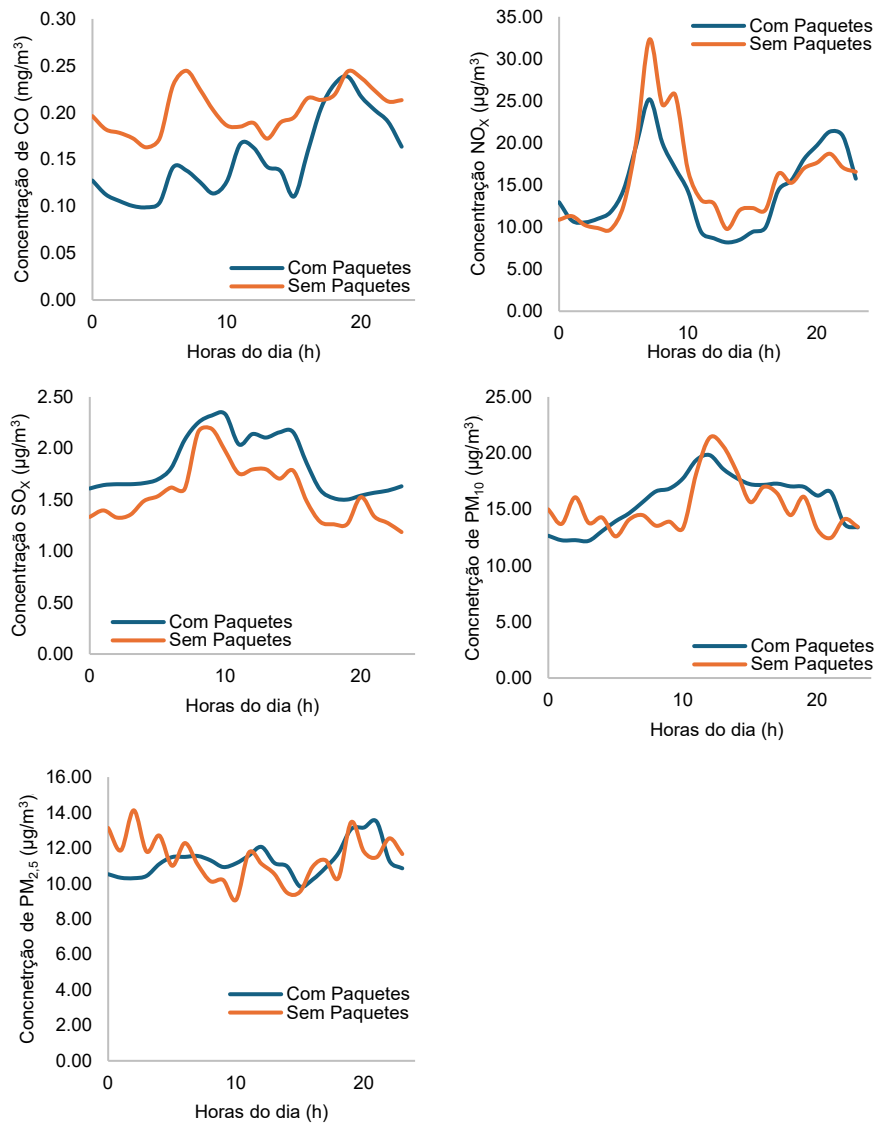


Anexo LXI – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de maio na “Estação-Física”

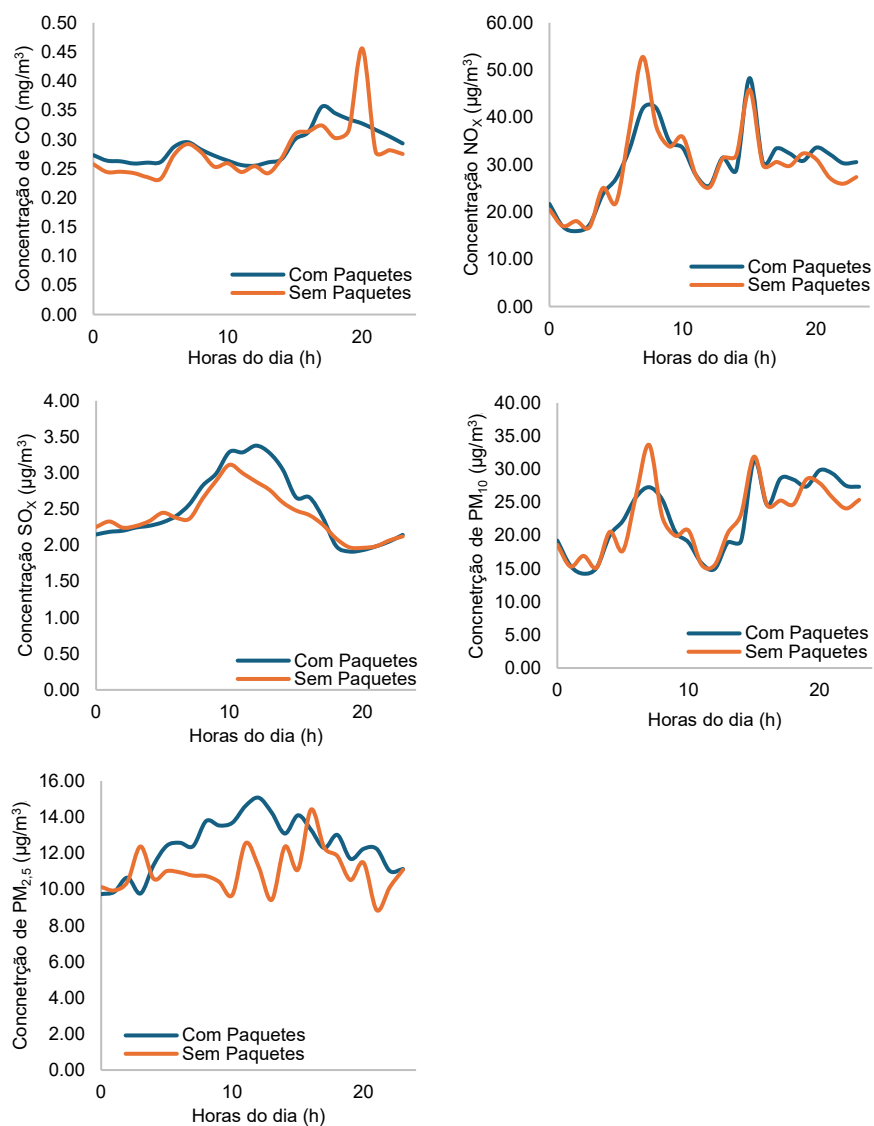


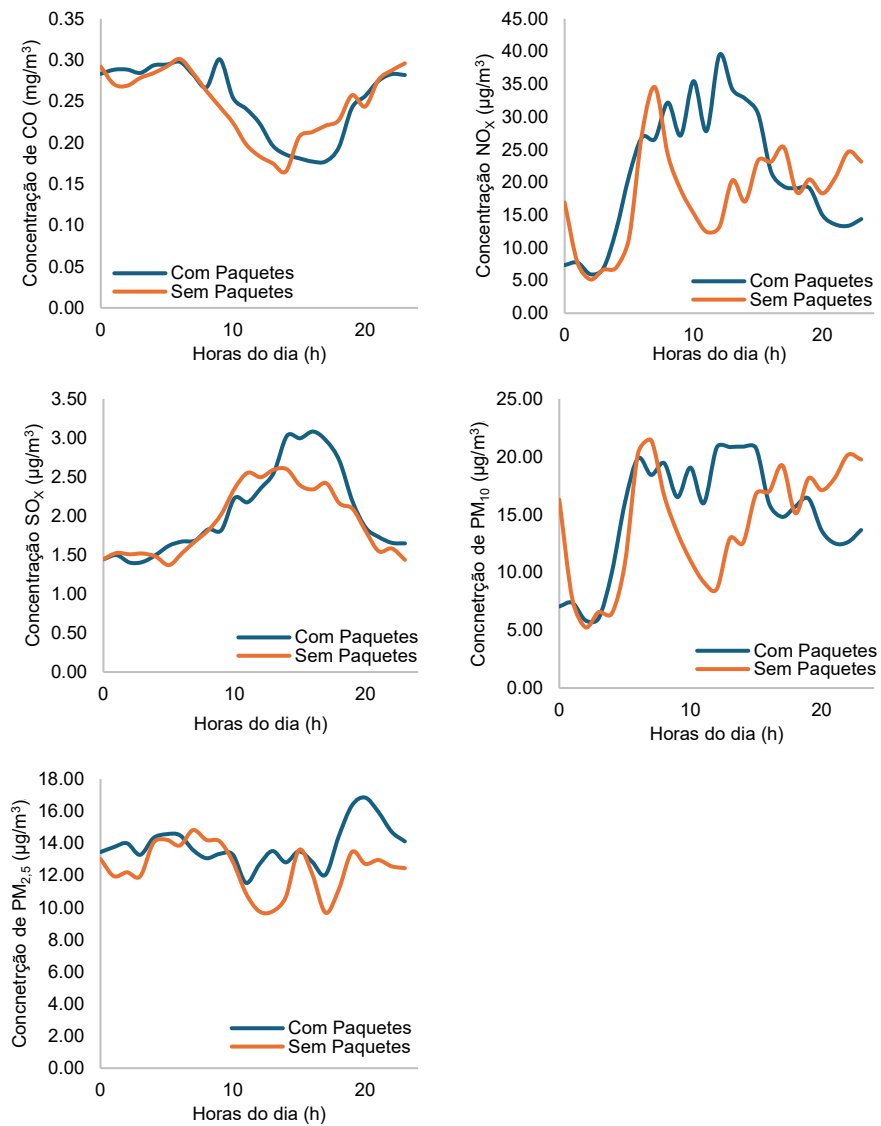
Anexo LXII – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de maio na “P1-Móvel”

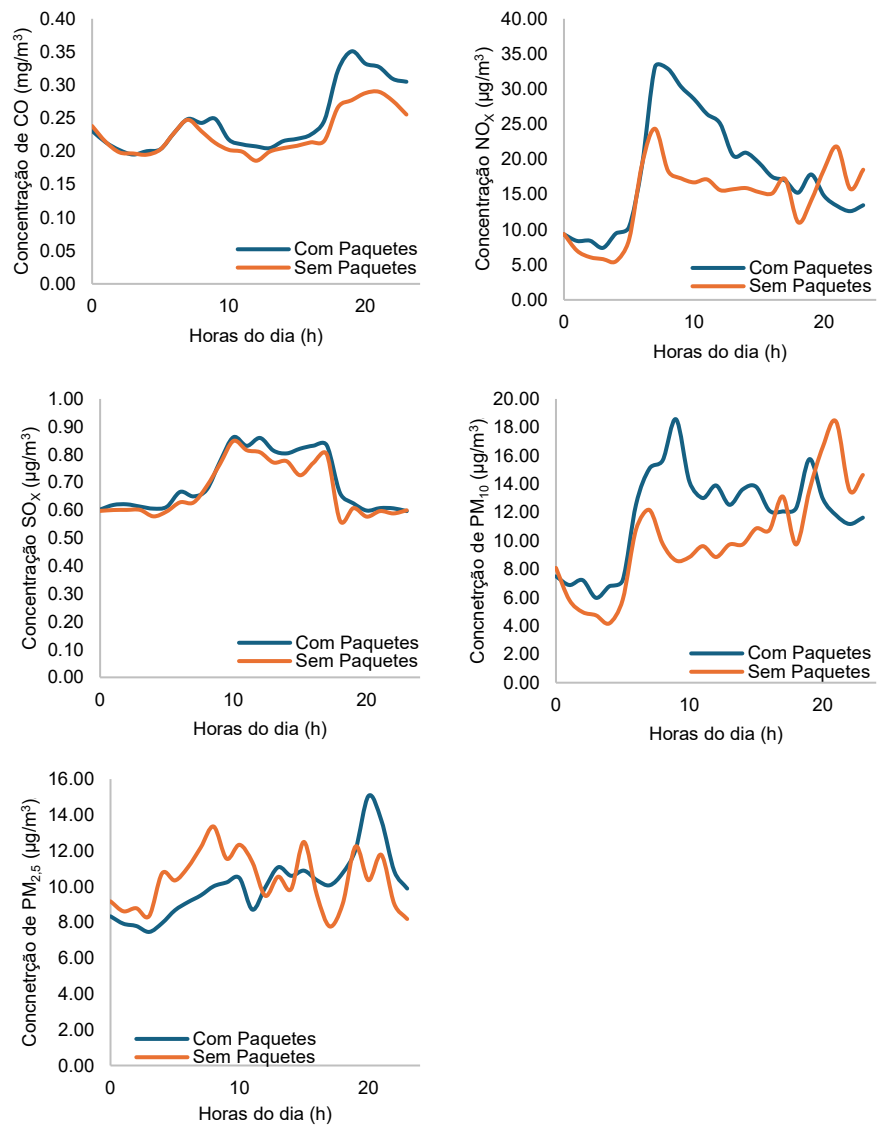
Anexo LXIII– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de maio na “P2-Móvel”

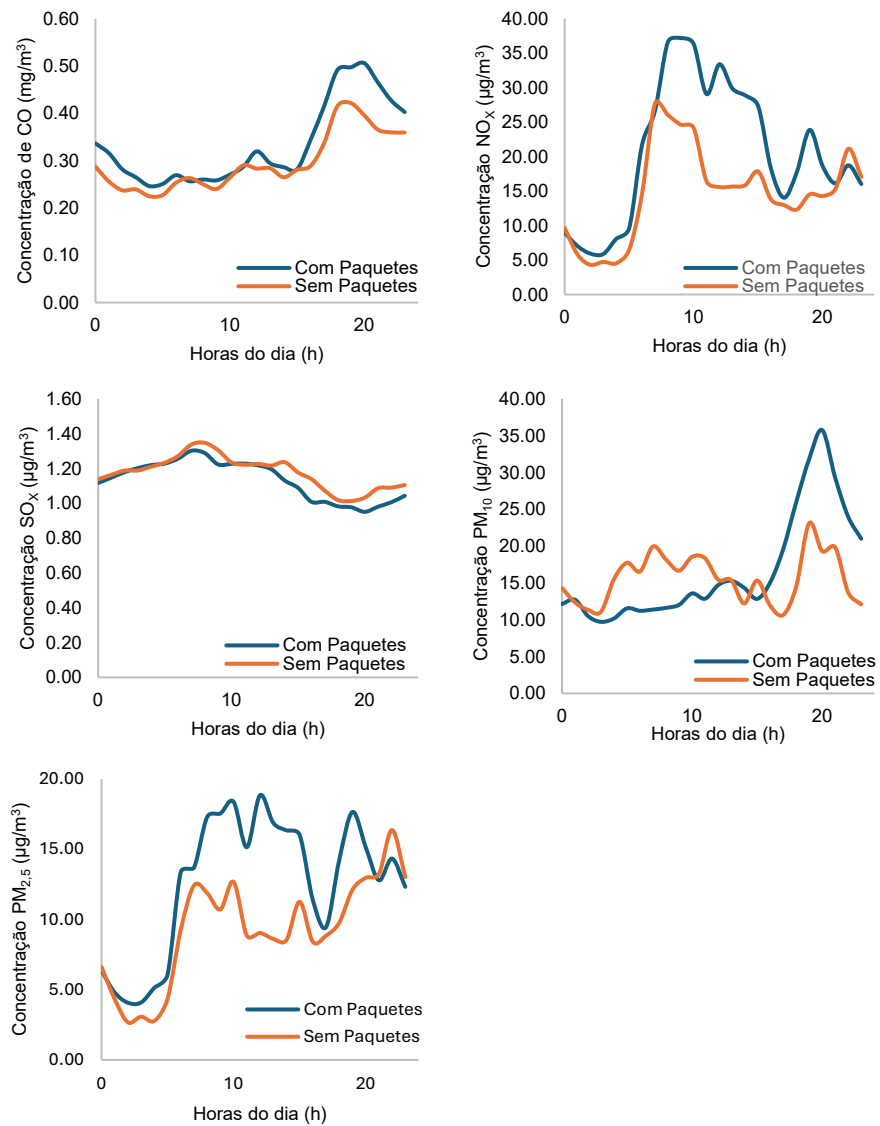


Anexo LXIV – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de maio na “P3-Móvel”

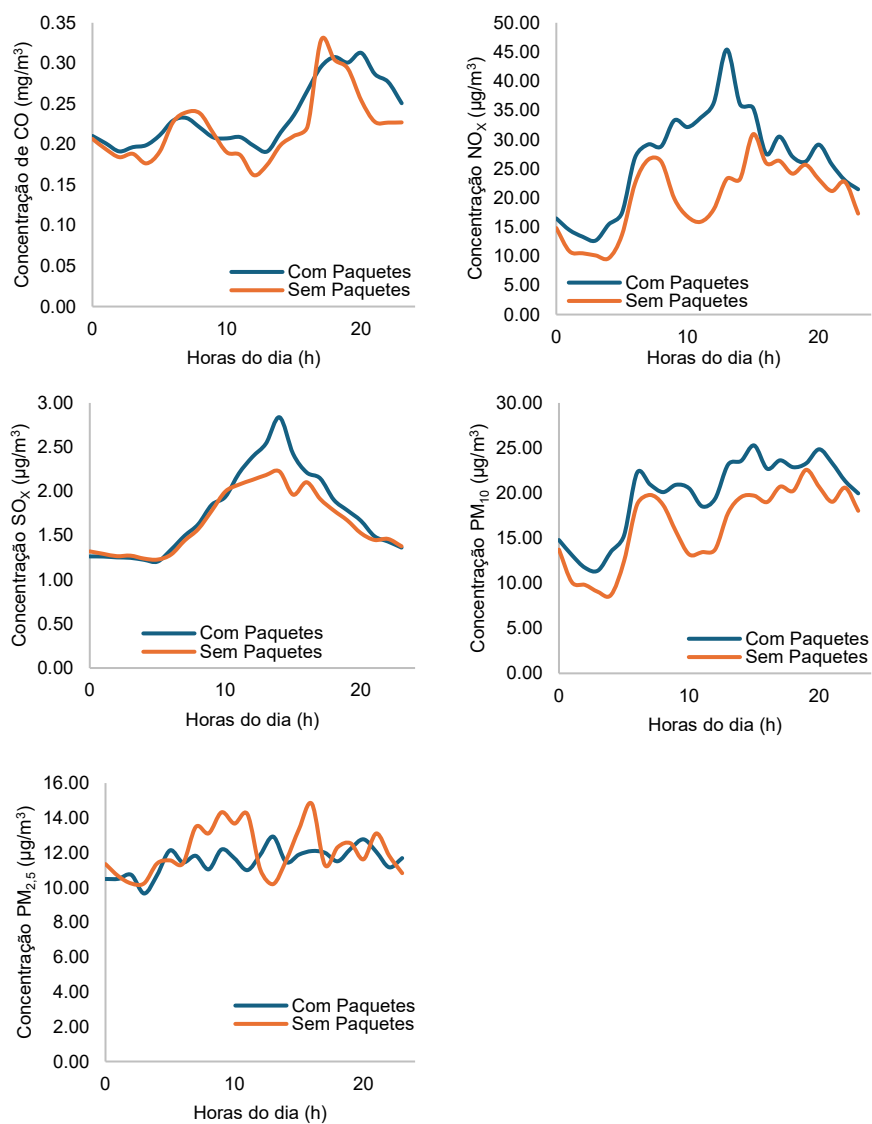


Anexo LXV – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de junho na “Estação-Física”

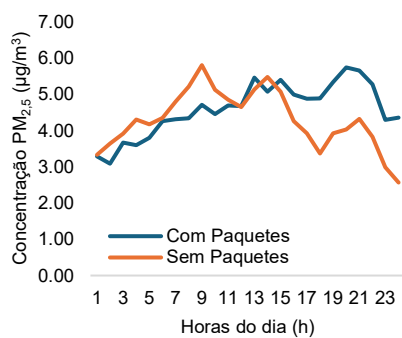
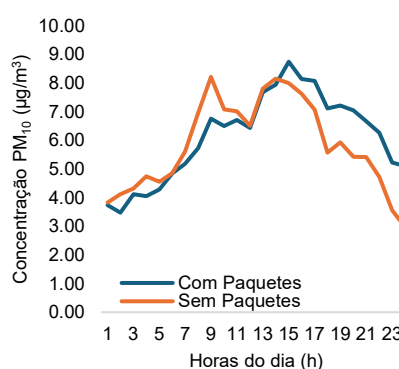
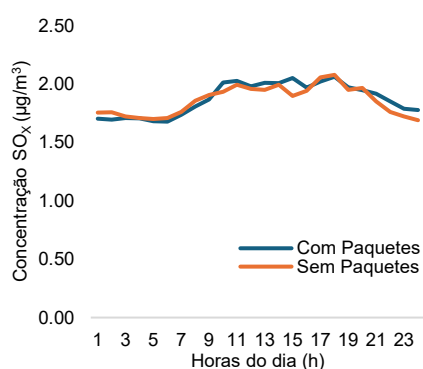
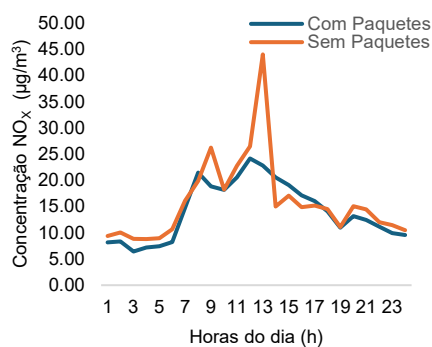
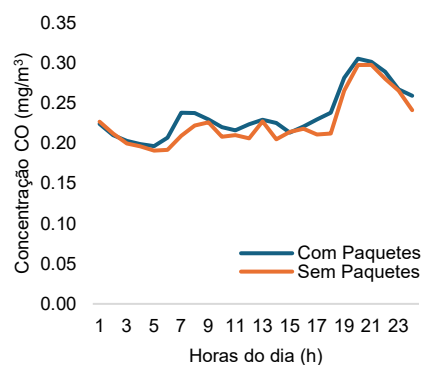
Anexo LXVI– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de junho na “P1-Móvel”

Anexo LXVII– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de junho na “P2-Móvel”

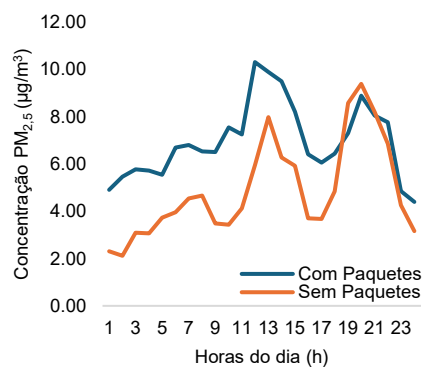
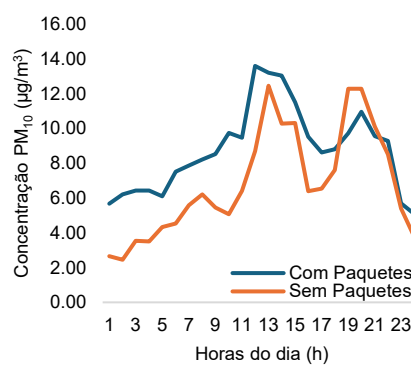
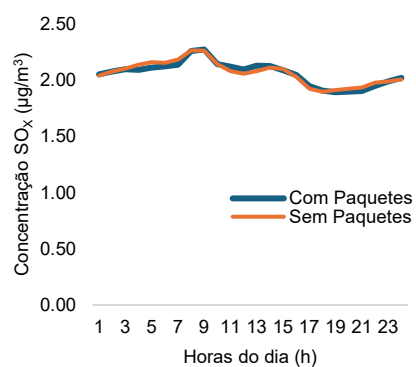
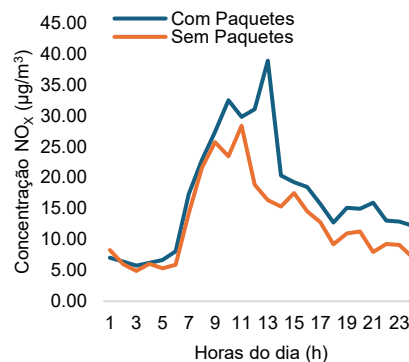
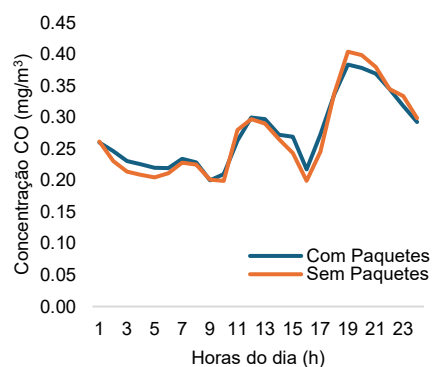
Anexo LXVIII– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de junho na “P3-Móvel”



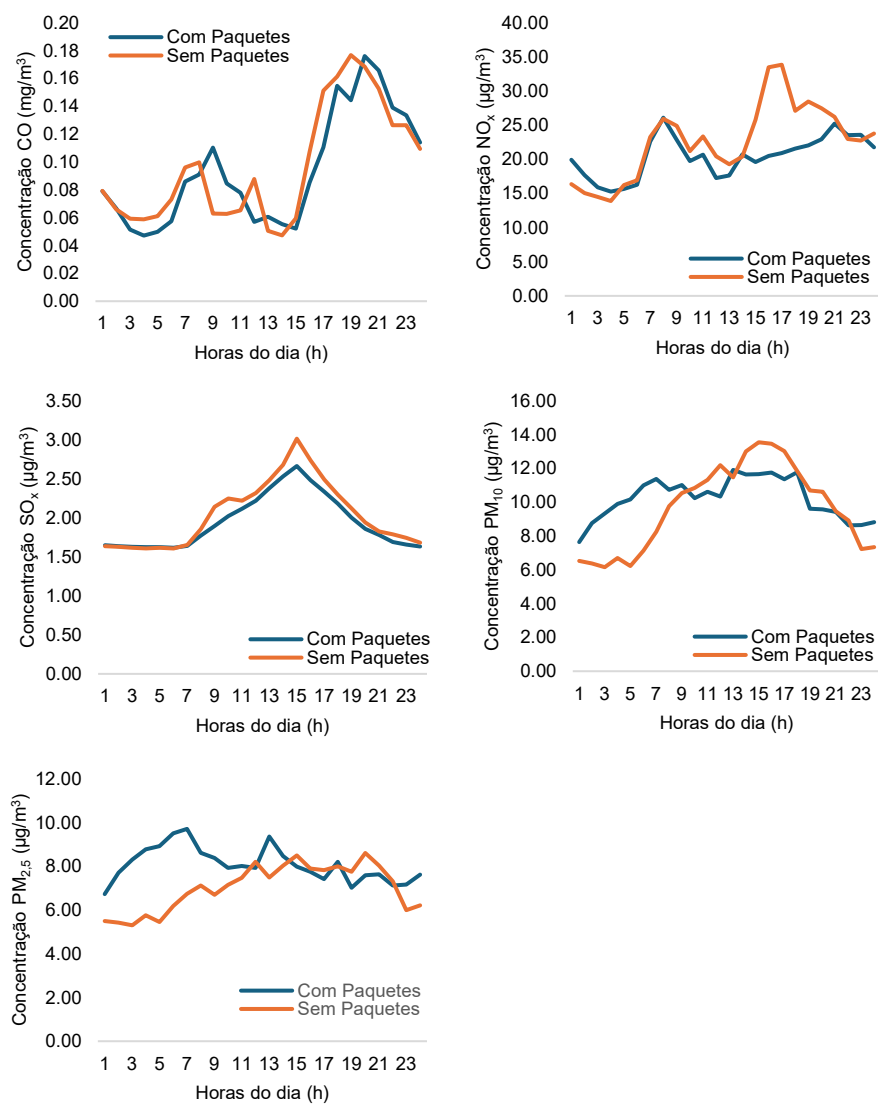
Anexo LXIX– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de julho na “P1-Móvel”



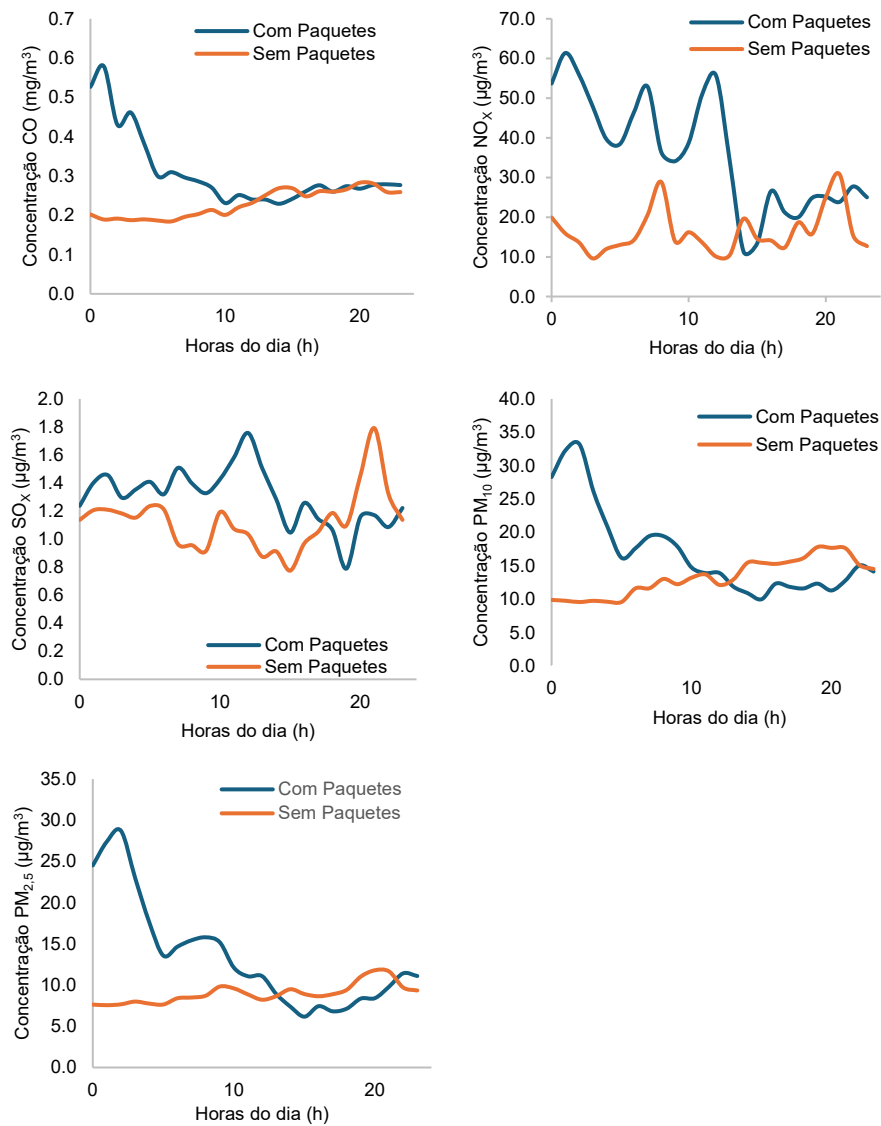
Anexo LXX – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de julho na “P2-Móvel”



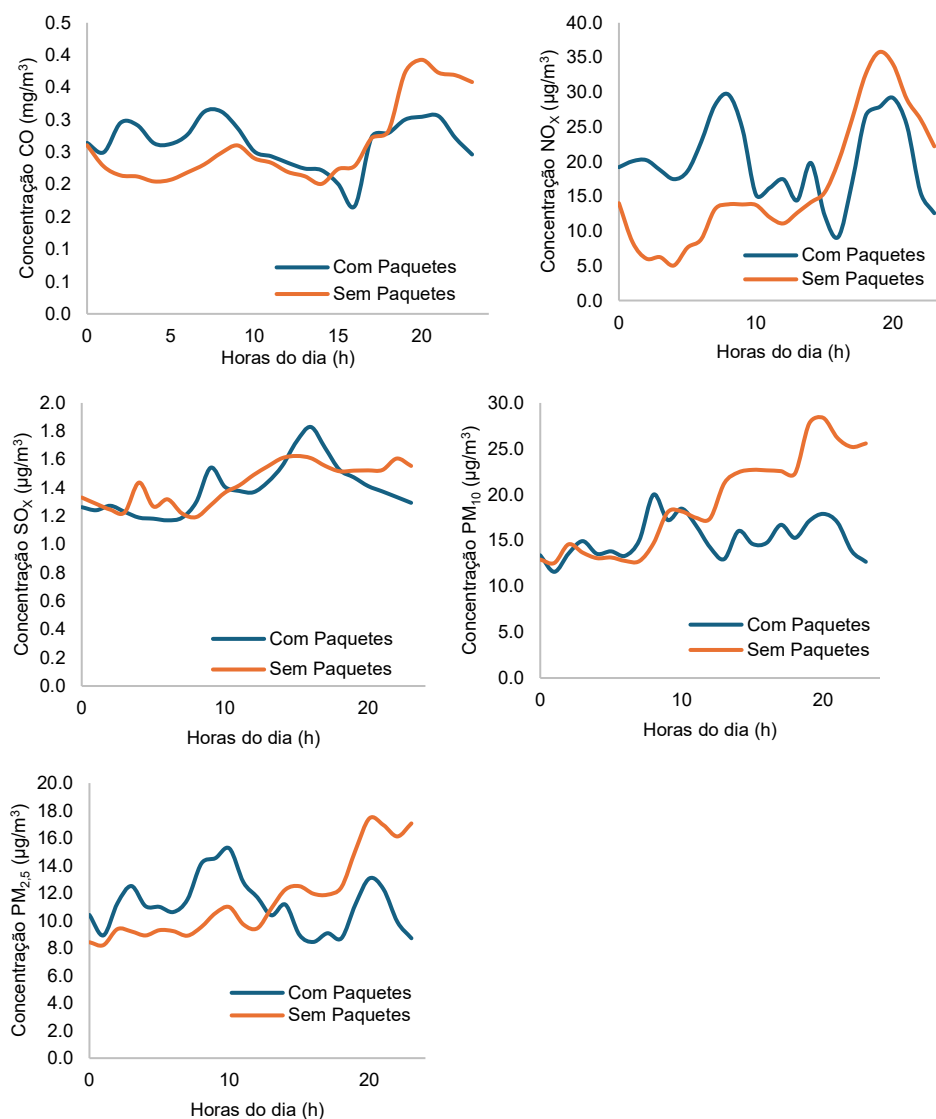
Anexo LXXI– Variação média da concentração dos poluentes em dias de semana de julho na “P3-Móvel”



Anexo LXXII– Variação média da concentração do poluentes em dias de fim de semana de fevereiro na “Estação-Física”



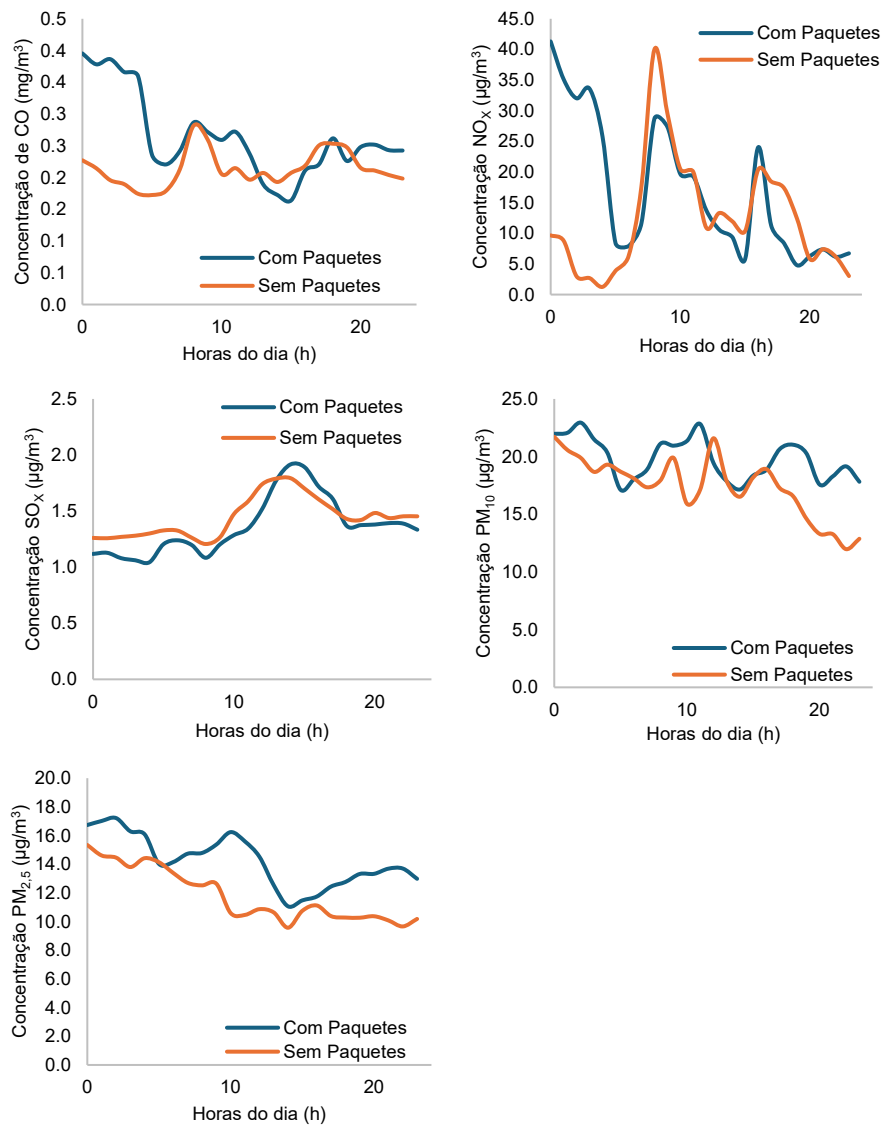
Anexo LXXII– Variação média da concentração do poluentes em dias de fim de semana de fevereiro na “P1-Móvel”



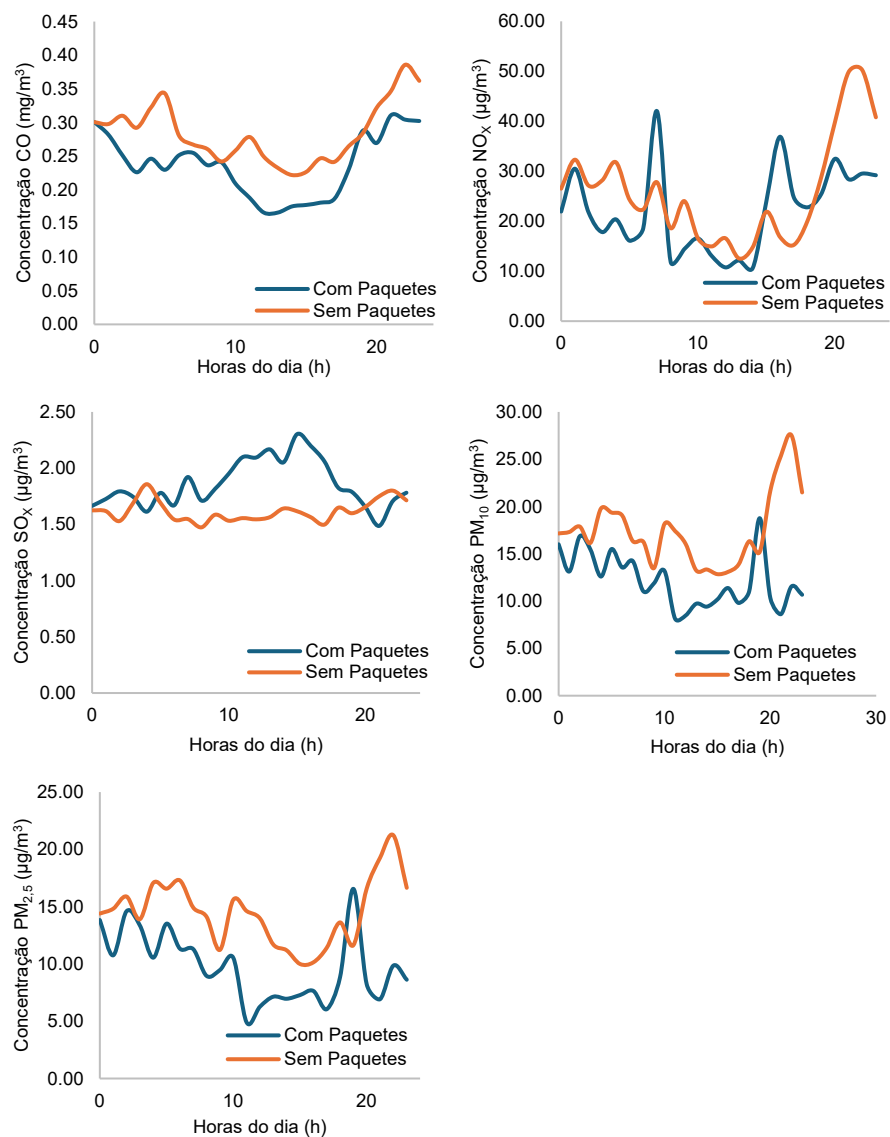
Anexo LXXIII– Variação média da concentração do poluentes em dias de fim de semana de fevereiro na “P2-Móvel”



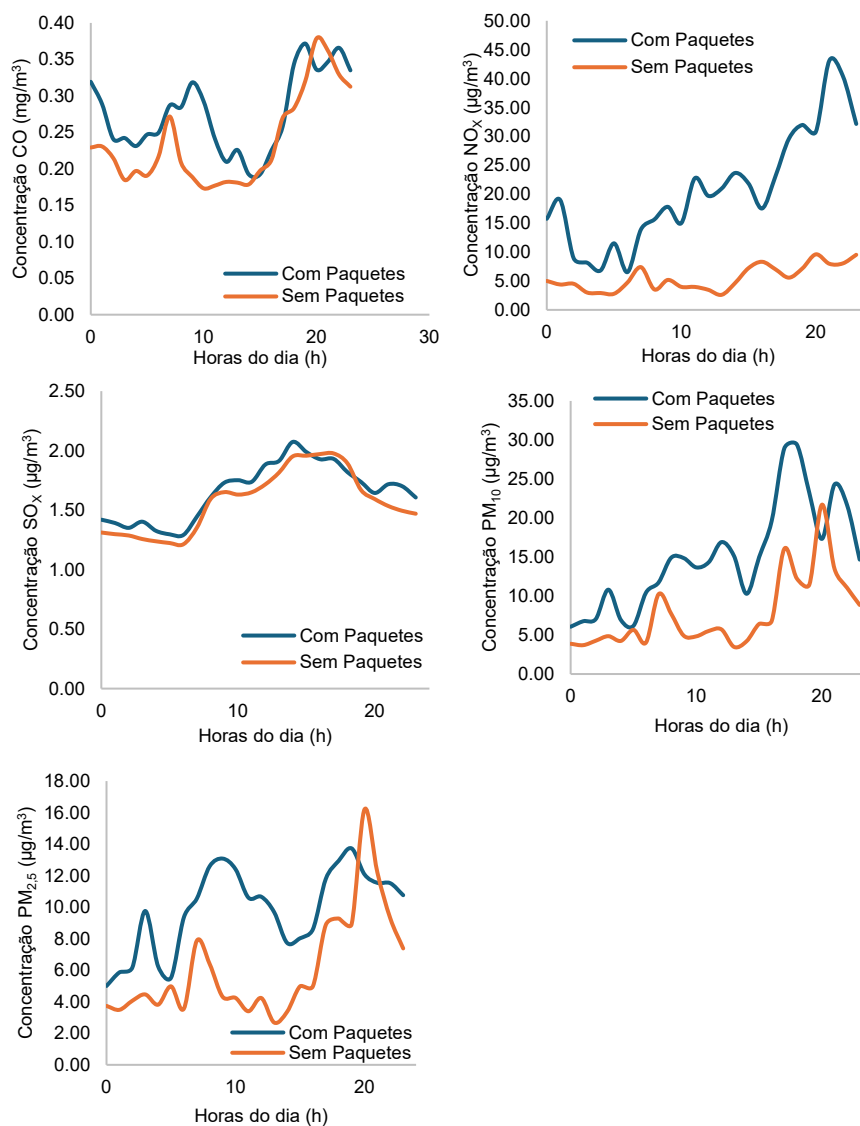
Anexo LXXIV– Variação média da concentração do poluentes em dias de fim de semana de fevereiro na “P3-Móvel”



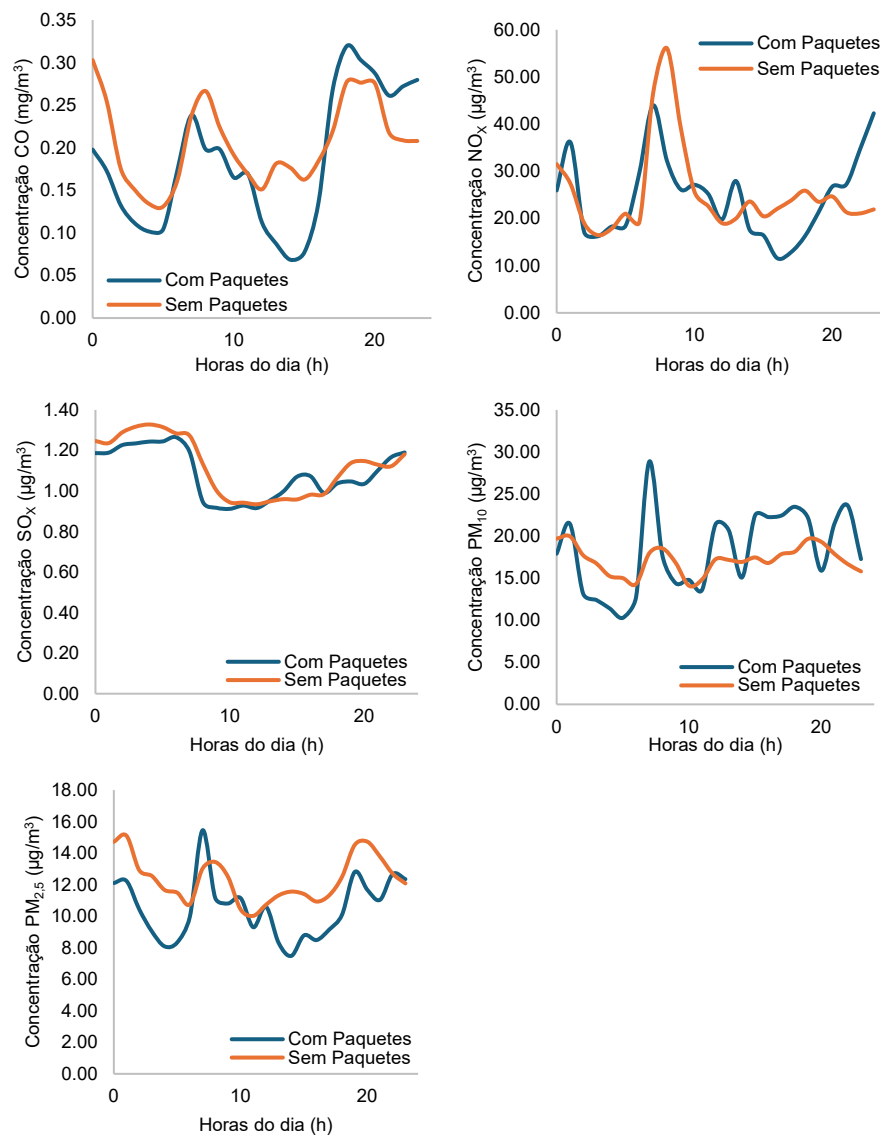
Anexo LXXV– Variação média da concentração do poluentes em dias de fim de semana de março na “Estação-Física”



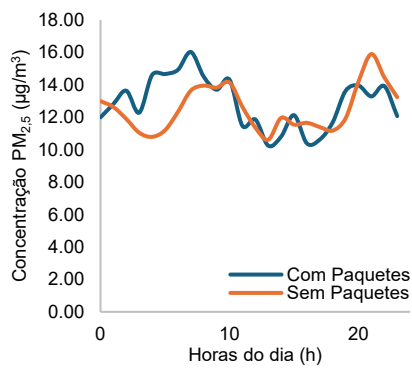
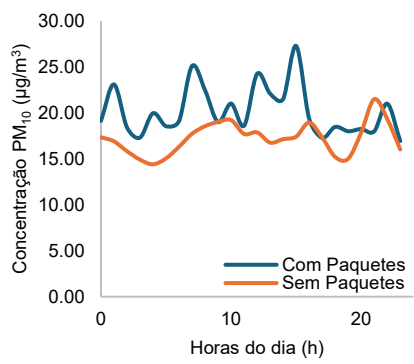
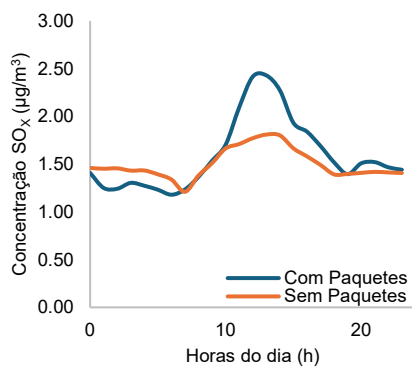
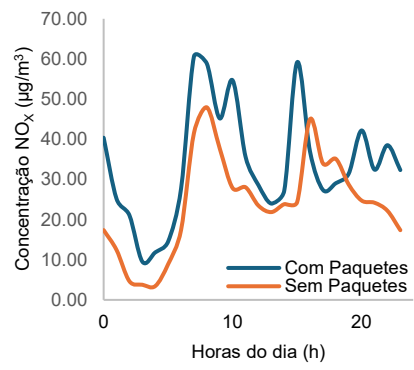
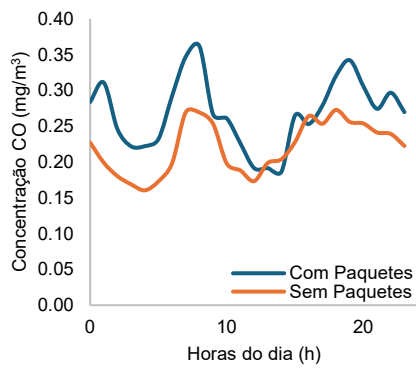
Anexo LXXVI– Variação média da concentração do poluentes em dias de fim de semana de março na “P1-Móvel”



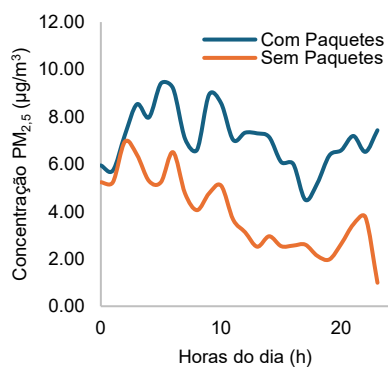
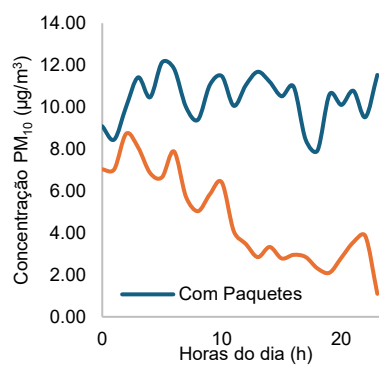
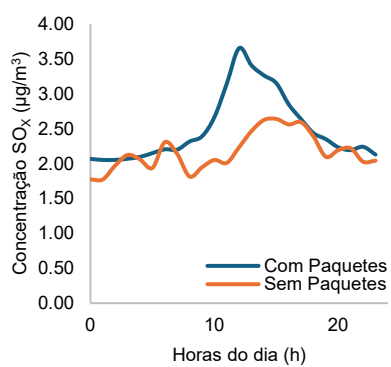
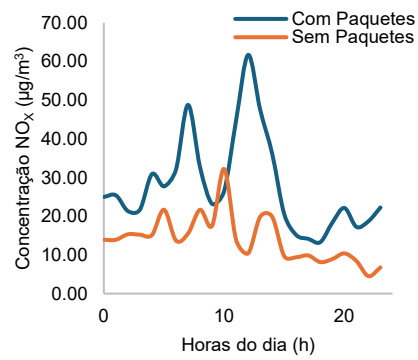
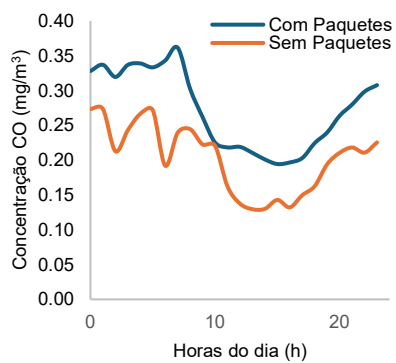
Anexo LXXVII – Variação média da concentração do poluentes em dias de fim de semana de março na “P2-Móvel”



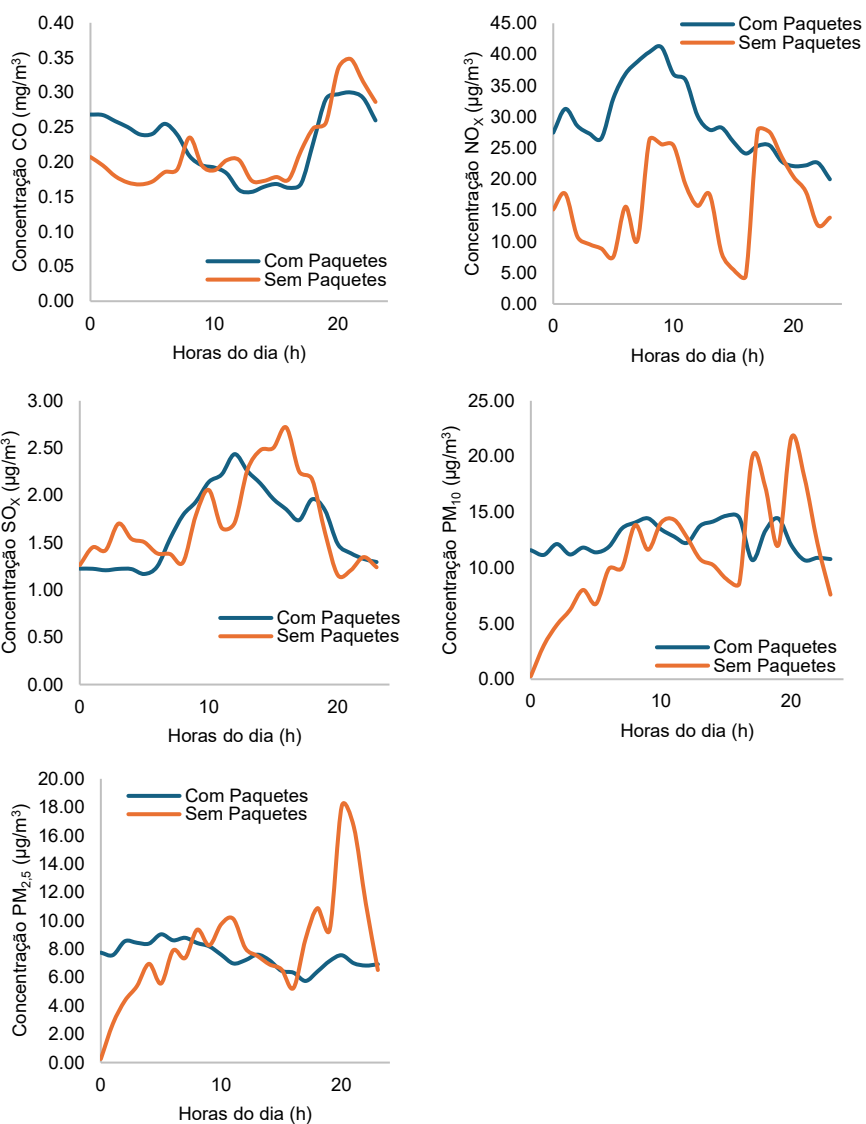
Anexo LXXVIII– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de março na “Estação-Física”



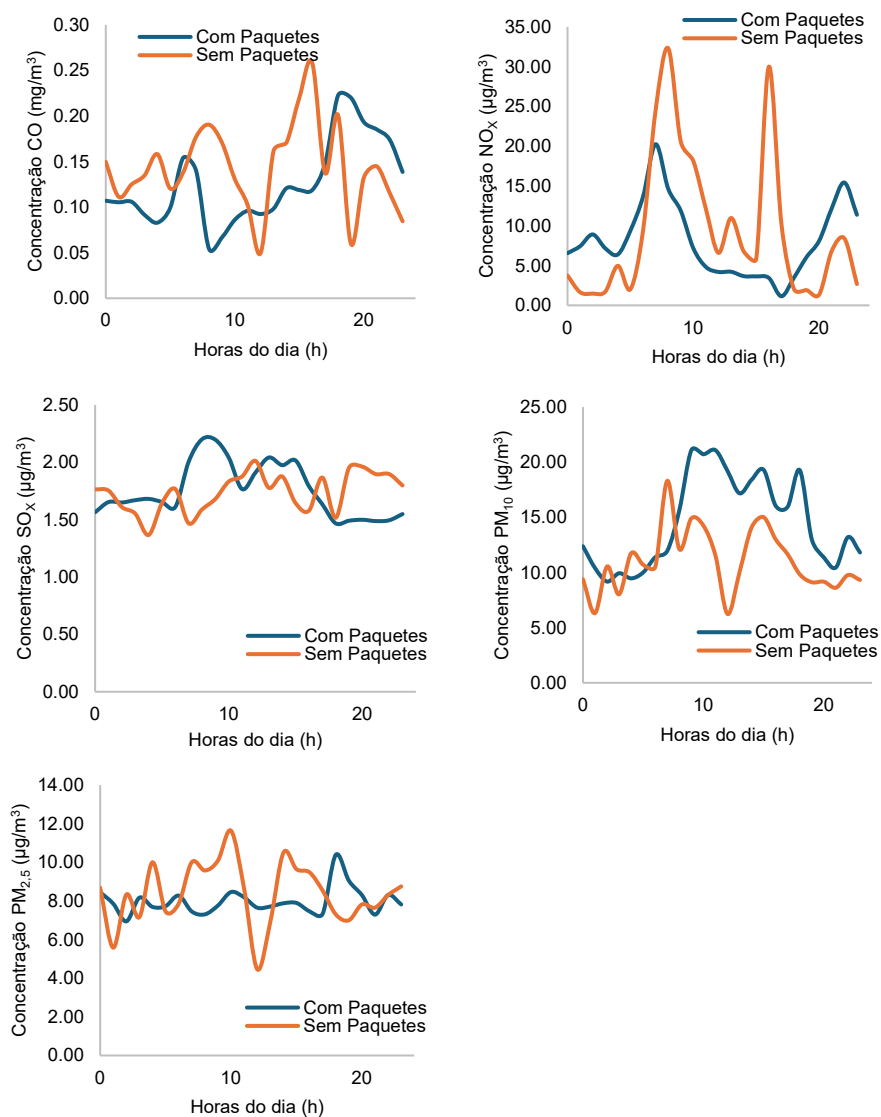
Anexo LXXIX– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de abril na “Estação-Física”



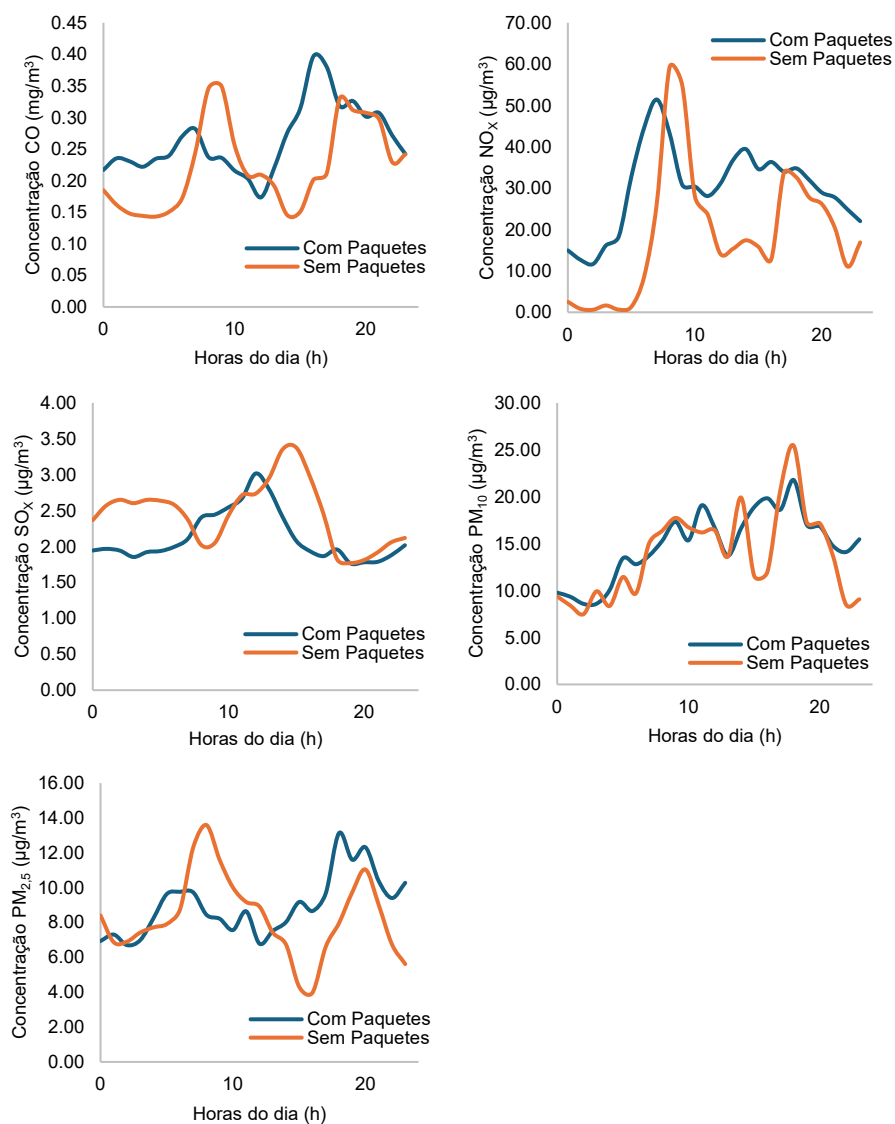
Anexo LXXX– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de abril na “P1-Móvel”



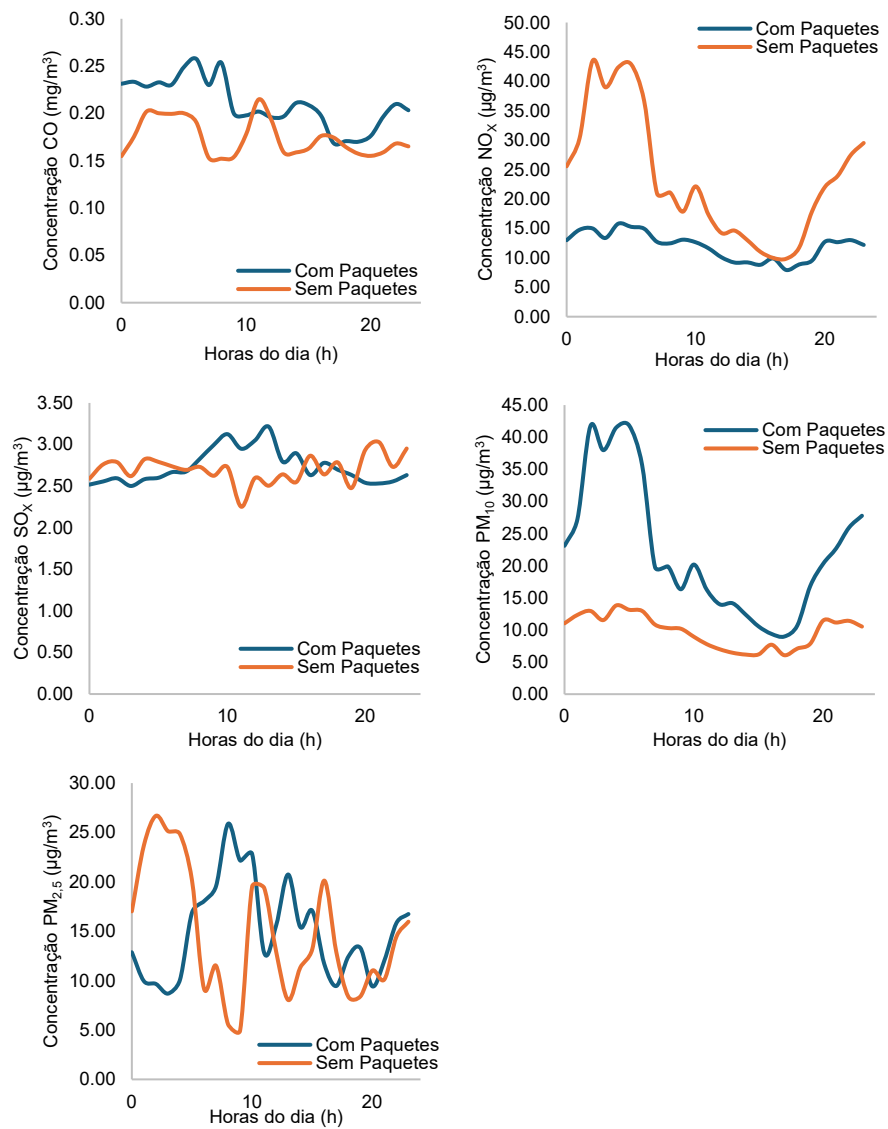
Anexo LXXXI – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de abril na “P2-Móvel”



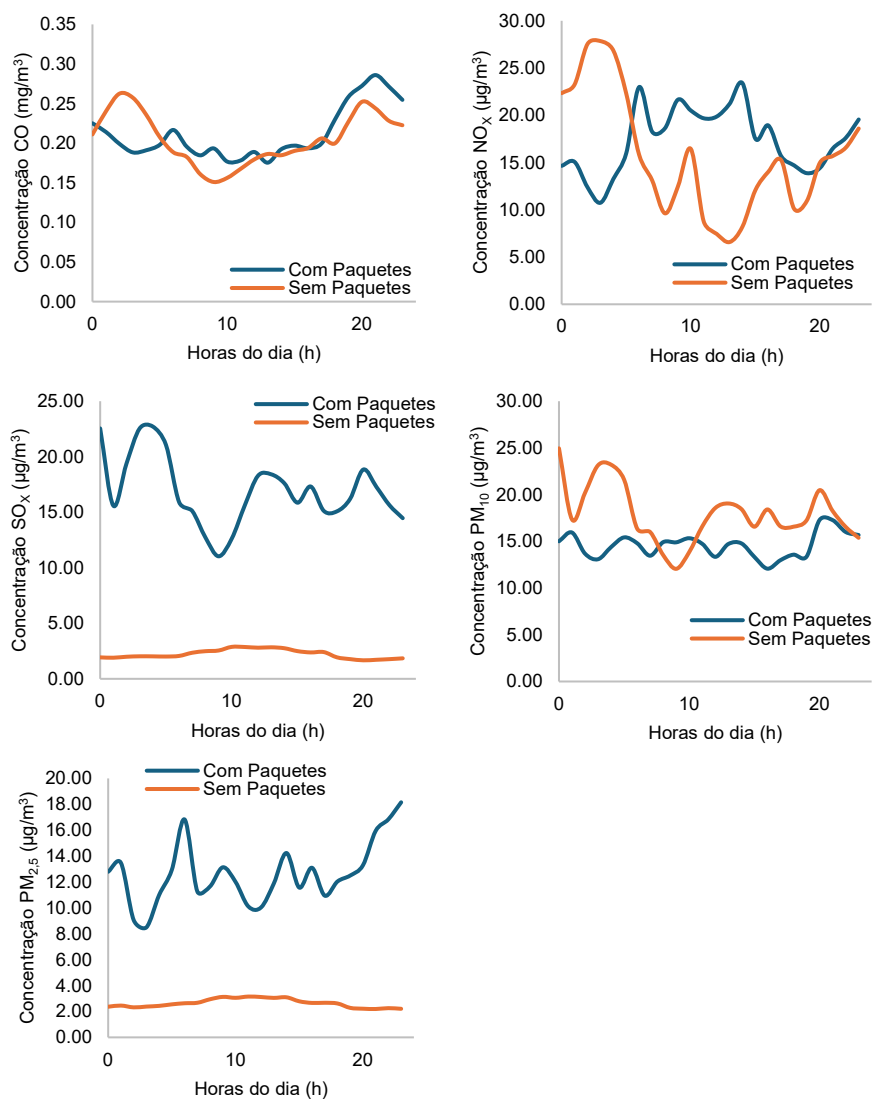
Anexo LXXXII – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de abril na “P3-Móvel”



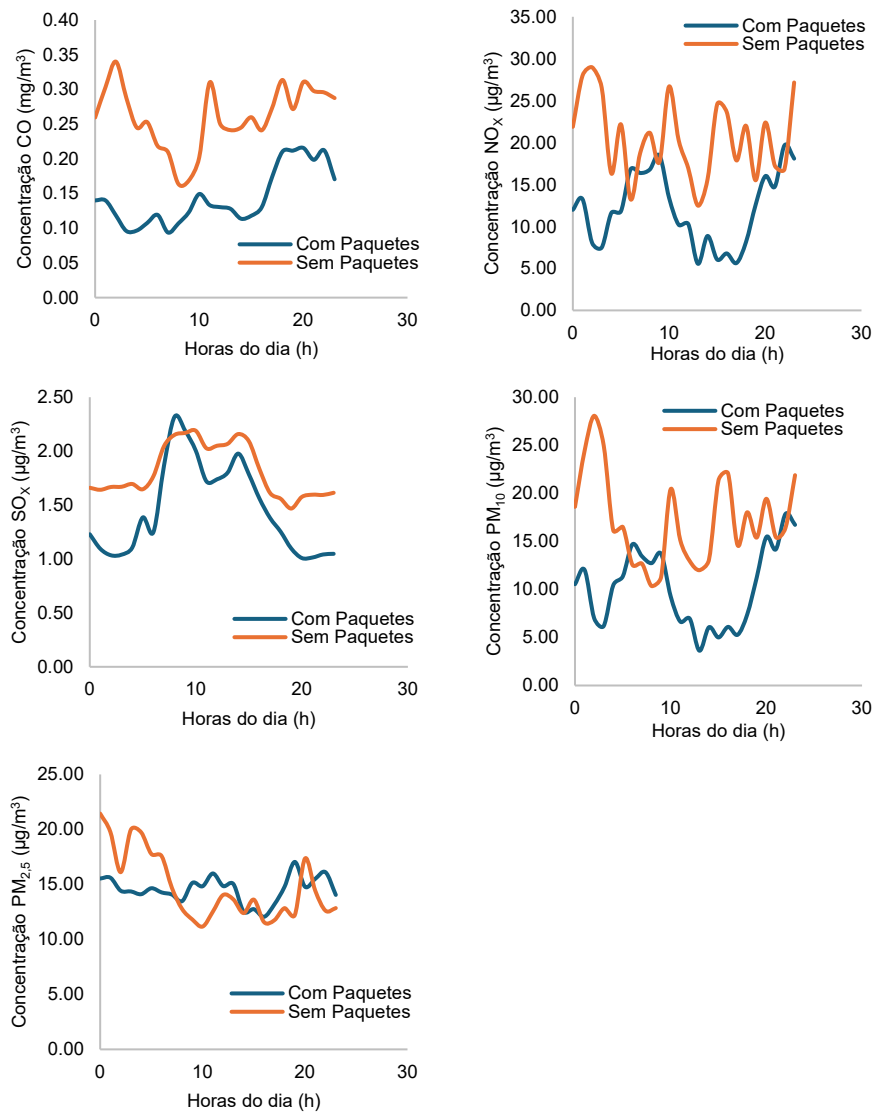
Anexo LXXXIII– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de maio na “Estação-Física”



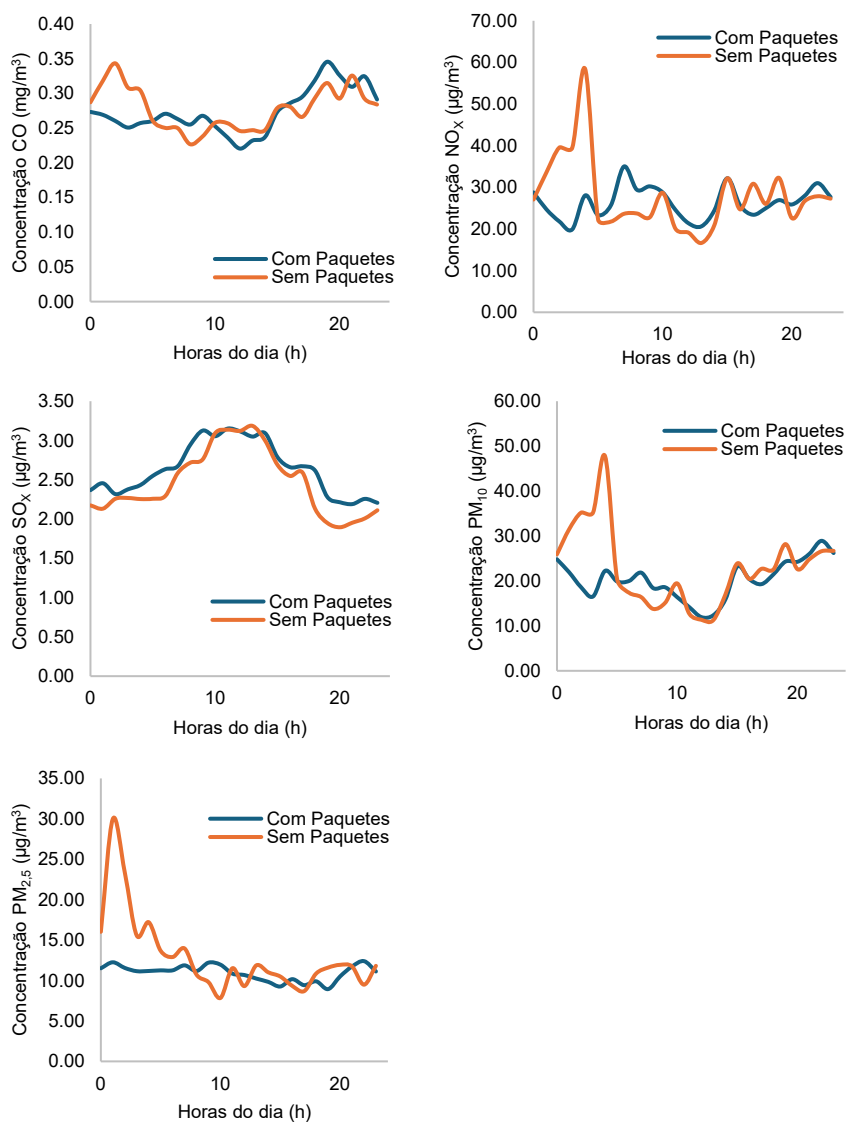
Anexo LXXXIV – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de maio na “P1-Móvel”

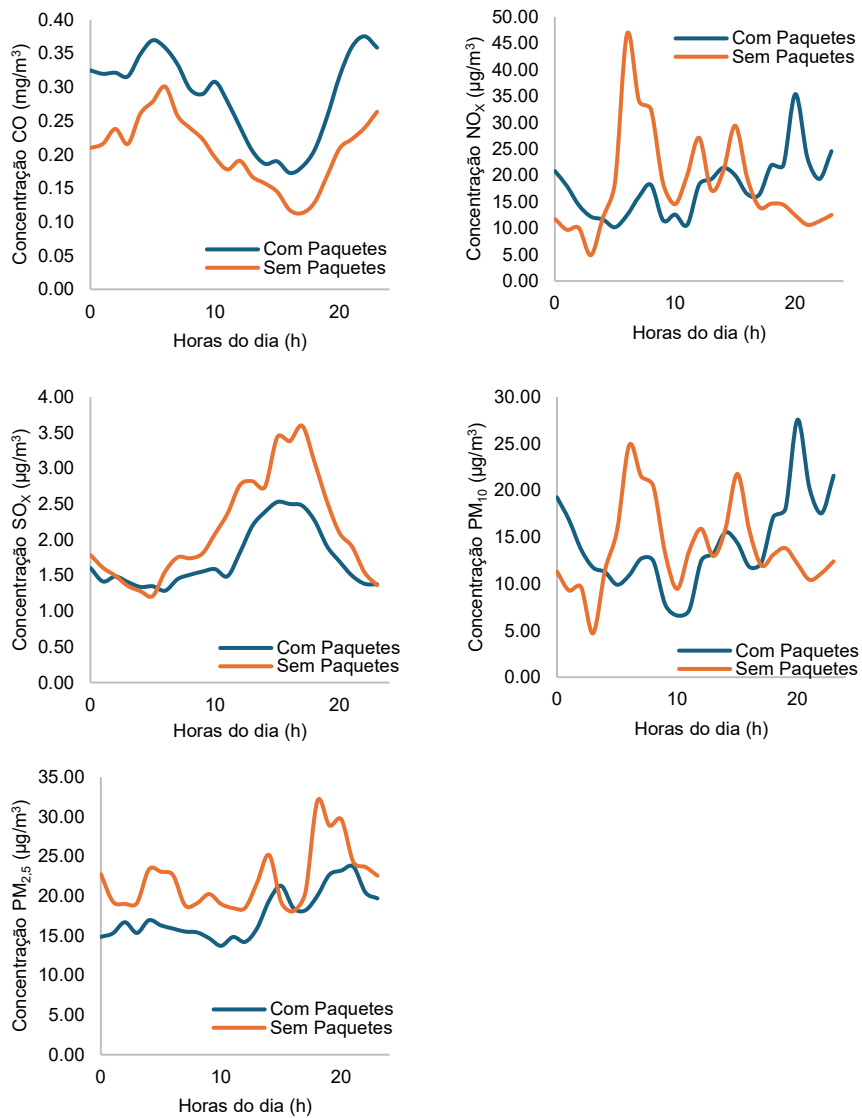


Anexo LXXXV – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de maio na “P2-Móvel”

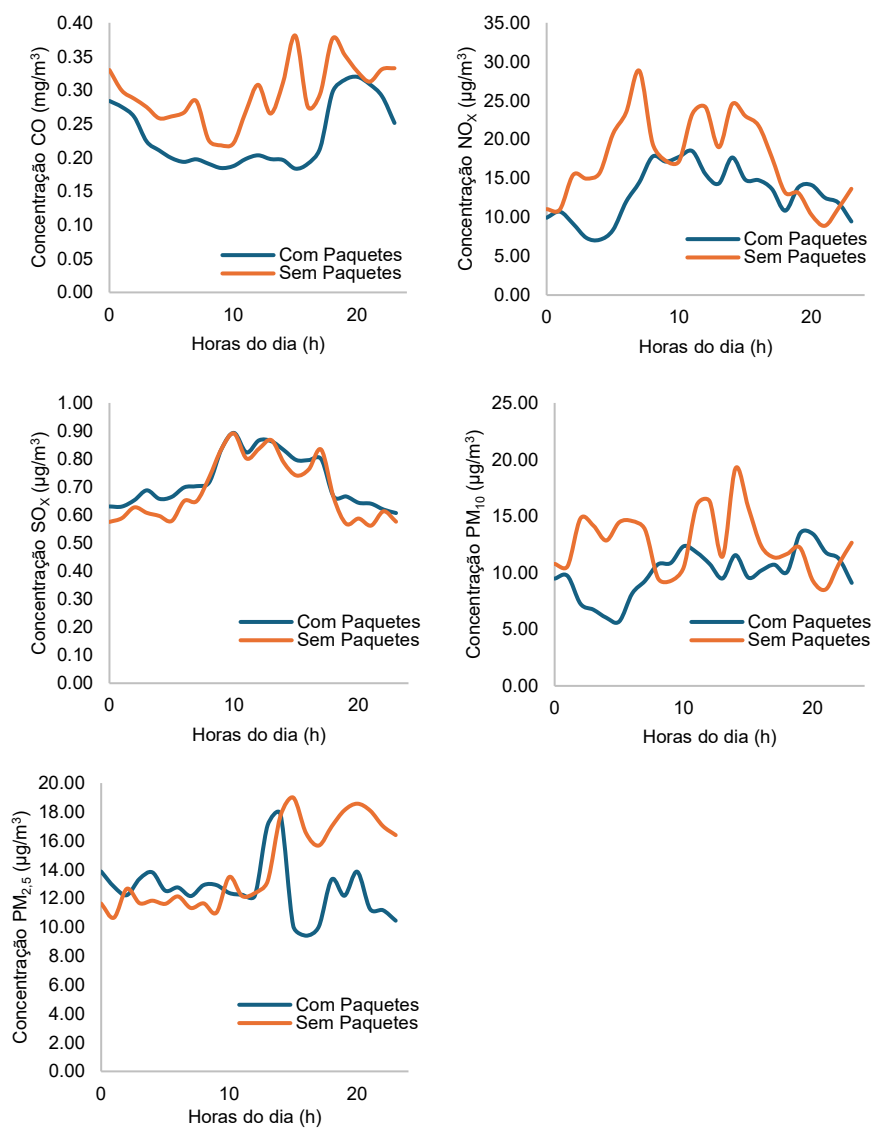


Anexo LXXXVI – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de maio na “P3-Móvel”

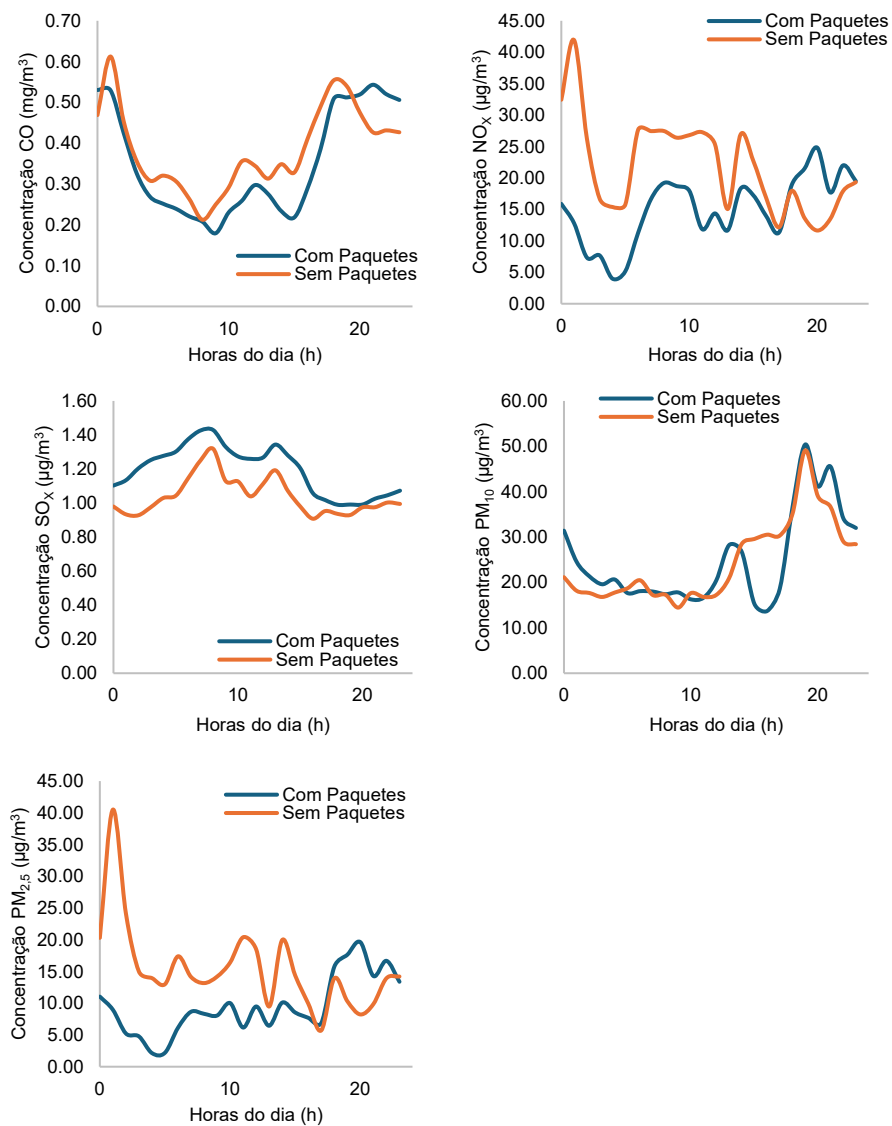


Anexo LXXXVII– Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de junho na “Estação-Física”

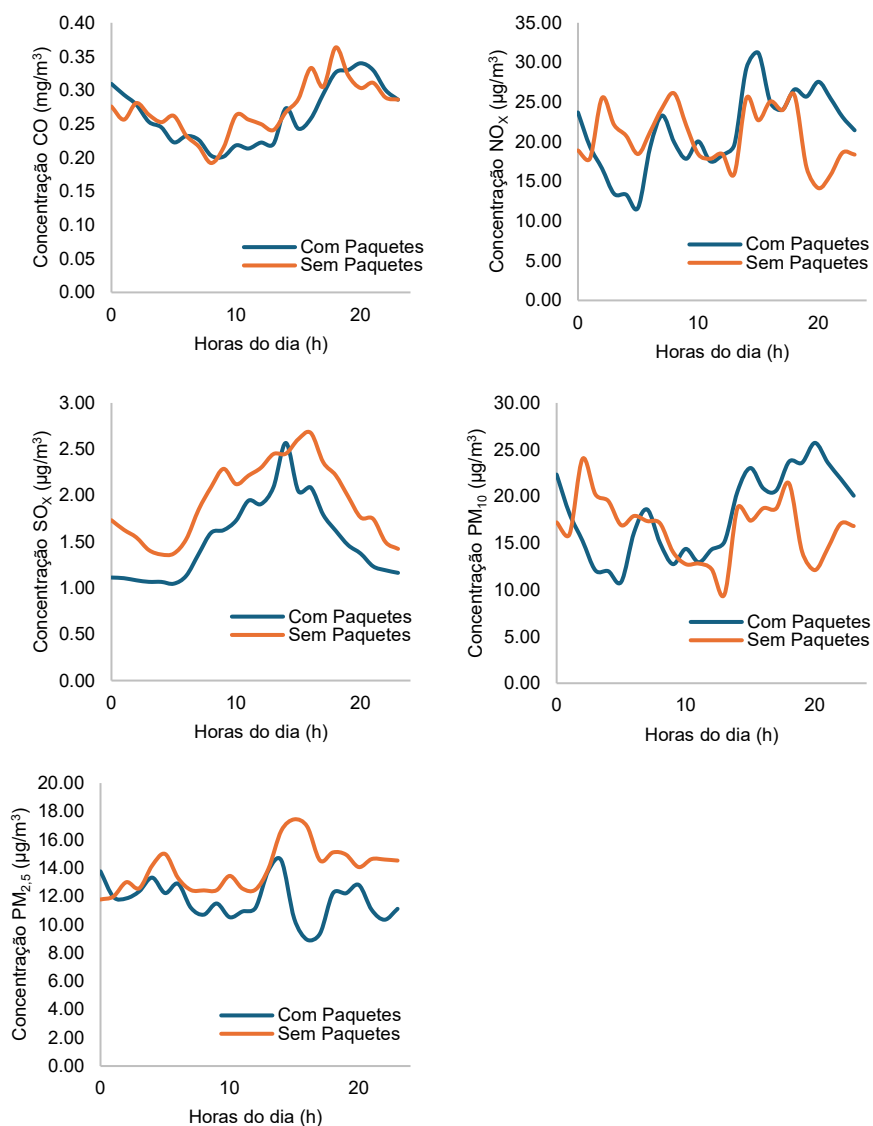
Anexo LXXXVIII – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de junho na “P1-Móvel”



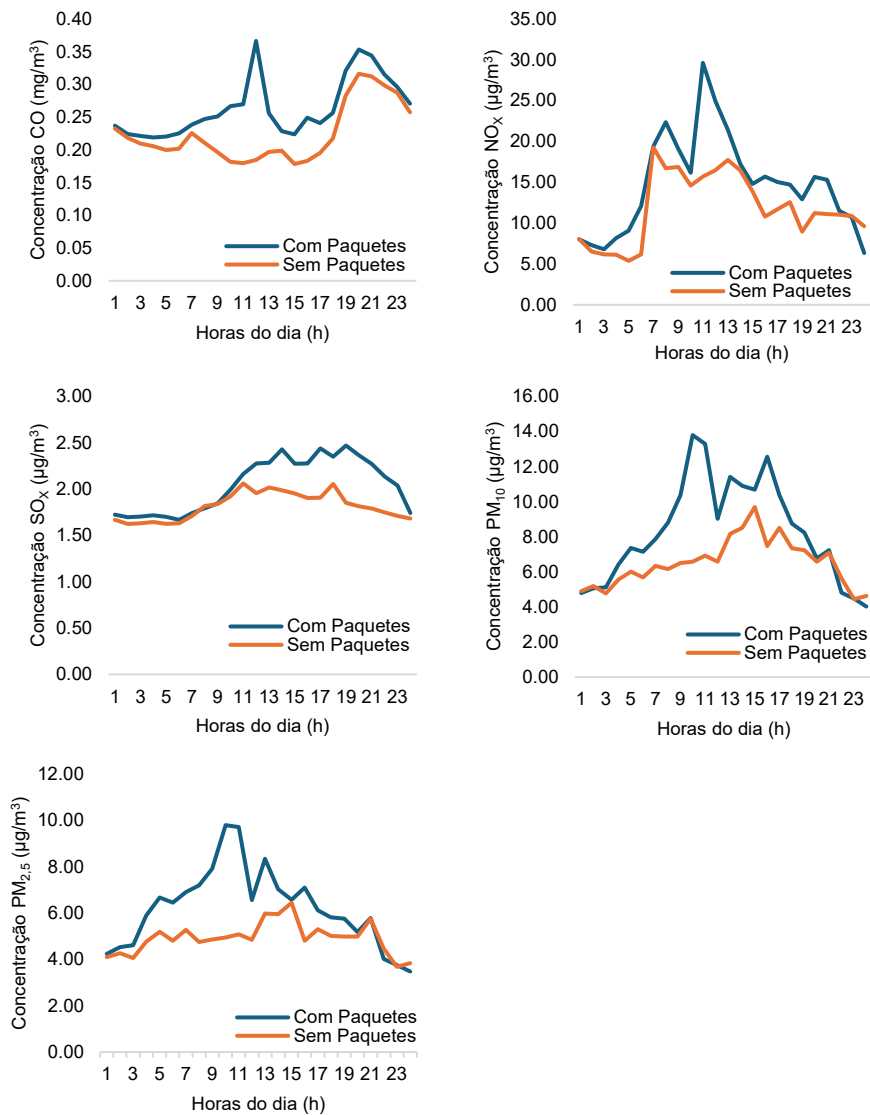
Anexo LXXXIX – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de junho na “P2-Móvel”



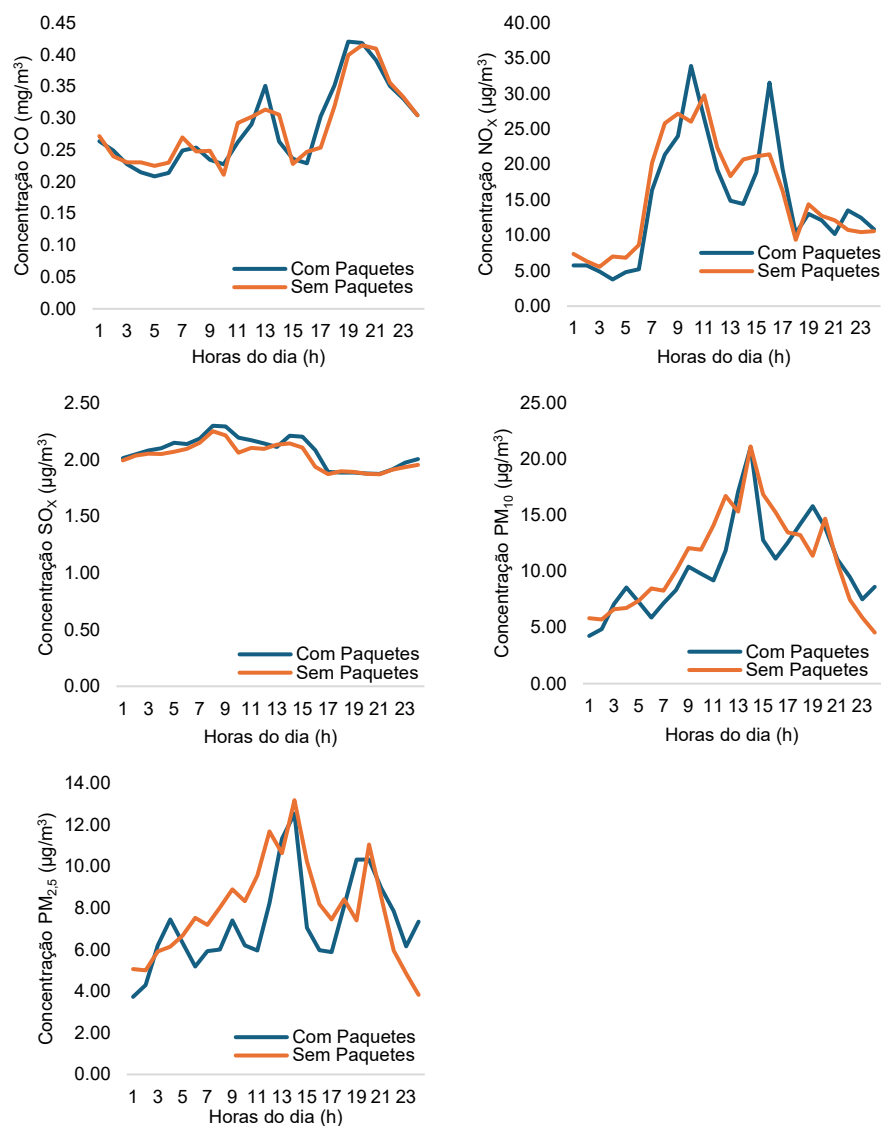
Anexo XC – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de junho na “P3-Móvel”



Anexo XCI – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de julho na “P1-Móvel”



Anexo XCII – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de julho na “P2-Móvel”



Anexo XCIII – Variação média da concentração do poluentes em dias de semana de julho na “P3-Móvel”

