

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM

COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Defesa de Doutorado

**Simulação da poluição atmosférica em regiões urbanas
costeiras utilizando o modelo WRF-Chem**

Apresentada por: Anderson da Silva Palmeira
Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira

Agosto 2023

Anderson da Silva Palmeira

Simulação da poluição atmosférica em regiões urbanas costeiras utilizando o modelo WRF-Chem

Defesa de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, Curso de Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**.

Área de conhecimento: Interdisciplinar

Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Salvador
Centro Universitário SENAI CIMATEC
2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

P172s Palmeira, Anderson da Silva

Simulação da poluição atmosférica em regiões urbanas costeiras utilizando o modelo WRF-Chem / Anderson da Silva Palmeira. – Salvador, 2023.

88 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira.

Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2023.

Inclui referências.

1. Dispersão de poluentes. 2. Brisa marítima. 3. DFA. 4. pDCCA. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Moreira, Davidson Martins. III. Título.

CDD 363.7392

Nota sobre o estilo do PPGMCTI

Esta defesa de doutorado foi elaborada considerando as normas de estilo (i.e. estéticas e estruturais) propostas aprovadas pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial e estão disponíveis em formato eletrônico (*download* na Página Web < http://ead.fieb.org.br/portal_faculdades/dissertacoes-e-teses-mcti.html > ou solicitação via *e-mail* à secretaria do programa) e em formato impresso somente para consulta.

Ressalta-se que o formato proposto considera diversos itens das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), entretanto opta-se, em alguns aspectos, seguir um estilo próprio elaborado e amadurecido pelos professores do programa de pós-graduação supracitado.

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, leu e aprovou a Tese de doutorado, intitulada “**Simulação da poluição atmosférica em regiões urbanas costeiras utilizando o modelo WRF-Chem**”, apresentada no dia 30 de agosto de 2023, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Orientador:	<p>Assinado eletronicamente por: Davidson Martins Moreira CPF: ***.832.500-** Data: 31/08/2023 17:35:28 -03:00</p> <p>Prof. Dr. Davidson Martins Moreira SENAI CIMATEC</p>
Membro Interno:	<p>Assinado eletronicamente por: Alex Álisson Bandeira Santos CPF: ***.191.765-** Data: 30/08/2023 21:10:36 -03:00</p> <p>Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos SENAI CIMATEC</p>
Membro Interno:	<p>Assinado eletronicamente por: MARCELO Albano MORET Simões Gonçalves CPF: ***.131.127-** Data: 05/09/2023 15:09:44 -03:00</p> <p>Prof. Dr. Marcelo Albano Moret Simões Gonçalves SENAI CIMATEC</p>
Membro Externo:	<p>Assinado eletronicamente por: Marcelo Romero de Moraes CPF: ***.279.180-** Data: 30/08/2023 20:48:52 -03:00</p> <p>Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes UNIPAMPA</p>
Membro Externo:	<p>Assinado eletronicamente por: Vânia Gonçalves de Brito dos Santos CPF: ***.449.445-** Data: 30/08/2023 23:37:11 -03:00</p> <p>Prof.ª Dr.ª Vania Goncalves de Brito dos Santos UNEB</p>

Dedico este trabalho ao meu Deus, fonte de inspiração e força, e a toda minha família.

Continuamos superando muitos obstáculos juntos, e sem o amor, o apoio e a fé que vocês me proporcionaram, esta jornada não teria sido possível.

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão ao meu orientador, cuja expertise, compreensão e paciência adicionaram imensamente ao meu desenvolvimento acadêmico.

Sua orientação e apoio foram inestimáveis.

Estendo meu agradecimento aos meus amigos, que proporcionaram encorajamento e camaradagem ao longo desta jornada. Em especial, gostaria de agradecer ao Patrick,

Davidson e ao Eder, cuja ajuda foi fundamental para alcançar este marco em minha vida acadêmica.

Resumo

A poluição atmosférica é um fator crítico que prejudica a biodiversidade, os ecossistemas, e a saúde humana. O aumento das concentrações de poluentes devido ao crescimento das áreas urbanas e industriais levou ao aumento das discussões científicas sobre este tópico, e a modelagem computacional é um importante instrumento de gestão para a tomada de decisões. Neste sentido, o principal objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do modelo de qualidade do ar WRF-Chem (Weather Research and Forecasting with Chemistry) para determinar o campo de concentração dos poluentes O₃ (ozônio), NO_x (óxidos de nitrogênio) e MP (material particulado) na região metropolitana de Salvador (RMS), particularmente analisando a influência da brisa marítima na dispersão destes poluentes. No entanto, para tal fim, é importante um inventário de fontes consistente, sendo realizadas primeiramente simulações usando os sistemas de modelos WRF-Chem e WRF-CMAQ para avaliar a dispersão de MP na região metropolitana de Vitória (RMV), onde existe um inventário bem documentado. Adicionalmente, na RMS foi feita uma avaliação da evolução dos poluentes medidos ao longo do tempo e a sua relação com quatro variáveis climáticas (irradiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento) utilizando as técnicas de DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) e ρ_{DCCA} (*Detrended Cross-Correlation Coefficient Analysis*). Os resultados mostram que o modelo WRF-Chem simula de forma mais satisfatória o campo de concentração de MP na RMV, onde o sistema WRF-CMAQ tende a subestimar a concentração. Na RMS, quando à entrada de brisa, percebe-se o transporte dos poluentes por grandes distâncias, apesar da maior concentração permanecer em regiões próximas das principais fontes. As concentrações na RMS, quando comparadas com os dados medidos locais, apresentam valores subestimados, o que sugere que o inventário das fontes ainda é incipiente. A utilização das técnicas DFA e ρ_{DCCA} indicam que os poluentes na RMS tendem a aumentar ao longo do tempo, prejudicando a qualidade do ar e afetando a saúde humana. Os resultados mostram uma correlação cruzada entre a poluição atmosférica e as variáveis climáticas que persistiu por um determinado período, com maior correlação entre concentração de O₃ e vento, principalmente temperatura, e correlação negativa com umidade para todas as estações de monitoramento. Além disso, ao contrário de O₃ e MP₁₀, as concentrações de NO_x sempre tiveram um comportamento persistente na região de estudo durante todo o período analisado.

Palavras-chave: WRF-Chem; dispersão de poluentes; brisa marítima; DFA; ρ_{DCCA}

Abstract

Air pollution is a critical factor that harms biodiversity, ecosystems, and human health. The increase in pollutant concentrations due to the growth of urban and industrial areas has led to increased scientific discussions on this topic, and computational modeling is an important management tool for decision-making. In this sense, the main objective of this work is to evaluate the performance of the air quality model WRF-Chem (Weather Research and Forecasting with Chemistry) to determine the concentration field of the pollutants O₃ (ozone), NO_x (nitrogen oxides) and PM (particulate matter) in the metropolitan region of Salvador (RMS), particularly analyzing the influence of the sea breeze on the dispersion of these pollutants. However, for this purpose, a consistent source inventory is important, and simulations were first performed using the WRF-Chem and WRF-CMAQ model systems to assess PM dispersion in the Vitoria metropolitan region (RMV), where a well-documented inventory exists. Additionally, in the RMS, an evaluation of the evolution of the measured pollutants over time and their relationship with four climatic variables (solar irradiance, air temperature, relative humidity and wind speed) was performed using the DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) and ρ_{DCCA} (*Detrended Cross-Correlation Coefficient Analysis*). The results show that the WRF-Chem model simulates more satisfactorily the PM concentration field in the RMV, where the WRF-CMAQ system tends to underestimate the concentration. In the RMS, when the breeze enters, the pollutants are transported over large distances, although the highest concentration remains in regions close to the main sources. The concentrations in the RMS, when compared with the local measured data, present underestimated values, which suggests that the inventory of sources is still incipient. The use of DFA and ρ_{DCCA} techniques indicate that pollutants in the MSR tend to increase over time, impairing air quality and affecting human health. The results show a cross-correlation between air pollution and climate variables that persisted for a certain period, with higher correlation between O₃ concentration and wind, especially temperature, and negative correlation with humidity for all monitoring stations. In addition, unlike O₃ and PM₁₀, NO_x concentrations always had a persistent behavior in the study region throughout the analyzed period.

Keywords: WRF-Chem; pollutant dispersion; sea breeze; DFA; ρ_{DCCA}

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Hipóteses da pesquisa	4
1.2	Objetivo geral	4
1.2.1	Objetivos específicos	4
2	Revisão Bibliográfica	7
2.1	Modelos de qualidade do ar (MQAr)	7
2.2	Os métodos DFA e $\rho DCCA$	8
2.3	Brisa Marítima	9
3	Camada Limite Planetária (CLP)	11
3.1	Estrutura da atmosfera	11
3.2	Camada limite planetária	11
3.3	Camada Limite Convectiva	13
3.3.1	Camada Superficial (CS)	13
3.3.2	Camada de Convecção Livre (CCL)	14
3.3.3	Camada Interfacial de Entranhamento ou Zona de Entranhamento (ZE)	14
3.4	Camada Residual (CR)	14
3.5	Camada Limite Estável (CLE)	14
3.6	A Camada Limite Interna e a brisa marítima	15
4	Metodologia	17
4.1	Metodologia empregada	17
4.1.1	Descrição dos dados de pesquisa	17
4.1.2	Coleta de Dados	17
4.2	Áreas de estudo	18
4.2.1	Modelos de qualidade do ar	20
4.2.2	Configuração dos modelos	20
4.3	Avaliação estatística com o DFA e $\rho DCCA$	26
4.3.1	Breve descrição dos métodos DFA e $\rho DCCA$	26
4.4	Índices estatísticos	28
5	Resultados Numéricos	30
5.1	Comparação dos modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ na RMV	30
5.1.1	Avaliação meteorológica com WRF	30
5.1.2	Análise de concentração MP10 e MP2.5 Média diária	32
5.2	Avaliação dos dados na RMS com os métodos DFA e $\rho DCCA$	42
5.3	Avaliação da poluição na atmosférica utilizando o modelo WRF/Chem na RMS	50
5.4	Avaliação do impacto do efeito de brisa na poluição atmosférica na RMS	61
6	Sumário e Conclusões	65
	Referências	69

Lista de Tabelas

4.1	O resumo das Configurações dos modelos	25
4.2	Emissão anual total de poluentes atmosféricos por setores	26
5.1	Índices estatísticos comparando dados observados e modelados de variáveis meteorológicas RMV (<i>Os dados são a média entre as estações, exceto para a direção do vento que foi considerada a média</i>)	31
5.2	Índices estatísticos comparando as concentrações de MP10 observadas e modeladas para as estações ST01 a ST07.	36
5.3	Índices estatísticos comparando as concentrações de MP2.5 observadas e modeladas para as estações ST04 e ST06.	37
5.4	Índices estatísticos para concentrações de MP10 com médias horárias no ciclo de 24 h para todas as estações.	38
5.5	Índices estatísticos para concentrações de MP2.5 com médias horárias no ciclo de 24 h para as estações ST04 e ST06. Média das 24horas MP2.5 (Shing-Hong)	39
5.6	Emissão anual total de poluentes atmosféricos por setor	52
5.7	Índices estatísticos referentes às concentrações médias diárias de MP10 na RMS.	56
5.8	Índices estatísticos referentes às concentrações médias diárias de O3 na RMS.	56
5.9	Índices estatísticos referentes às concentrações médias diárias de NO2 na RMS.	56

Lista de Figuras

3.1	Divisão da troposfera.	11
3.2	Evolução temporal da CLP.	12
3.3	Brisa marítima	15
3.4	Esquema da brisa marítima e a fumigação	16
4.1	Estações de monitoramento aéreo nas regiões de Botelho, Malembá e Gamboa na Baía de Todos os Santos, Bahia.	18
4.2	Localização das sete estações meteorológicas, as principais fontes pontuais e o setor naval na RMV.	19
4.3	Localização da RMV no Brasil. Domínios aninhados com resoluções de grade de 9 km (D01), 3 km (D02) e 1 km (D03) e a sua localização na grade menor (direita).	21
4.4	Fluxograma de sistemas de modelagem: a) WRF/CMAQ. O sistema utiliza SMOKE na preparação das emissões.	23
4.5	Fluxograma de sistemas de modelagem: b) WRF-Chem. O sistema utiliza SMOKE na preparação das emissões.	24
5.1	Evolução temporal da média diária WS10, WD10 e T2 dos dados medidos da RAMQAr e simulados com o modelo WRF - agosto/2015	30
5.2	Concentração média diária de MP10 para todas as estações (ST01 a ST07).	32
5.3	Comparação das médias diárias para MP2.5 entre os dados observados (linha preta) e WRF/Chem (linha azul) e WRF/CMAQ (linha vermelha) modelados para cada estação de qualidade do ar (ST04 e ST06).	33
5.4	Ciclo diurno de concentração média de MP10 para todas as estações (ST01 a ST07).	34
5.5	Ciclo diurno de concentração média de MP2.5 para todas as estações (ST04 e ST06).	35
5.6	Comparação das concentrações médias diárias no mês de Agosto de 2015 para MP10 e MP2.5 entre os modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ e a sua influência pela altura.	40
5.7	Comparação das médias das concentrações de 24h durante o mês de agosto para MP10 entre os modelos WRF/Chem (esquerda) e CMAQ (direita) na MRV, utilizando a parametrização Shing-Hong	41
5.8	Variáveis meteorológicas: a) umidade, b) radiação solar, c) temperatura e d) velocidade do vento	43
5.9	Rosa do vento para a estação Botelho. Fonte: Botelho	44
5.10	Rosa do vento para a estação Gamboa. Fonte: Gamboa	44
5.11	Rosa do vento para a estação Malembá. Fonte: Autoria própria, 2022.	44
5.12	Média mensal para a concentração de poluentes: a) NOx, b) MP10 e c) O3.	45
5.13	Evolução dos expoentes do DFA, considerando uma janela deslizante de 500 observações, para as concentrações de poluentes (MP10, NOx, O3): a) Botelho; b) Gamboa; c) Malembá.	46

5.14	ρ_{DCCA} entre: a) velocidade do vento; b) temperatura; c) irradiação solar; d) umidade e concentrações nas diferentes estações (As linhas tracejadas referem-se aos níveis críticos para analisar a significância estatística das correlações, considerando um nível de confiança de 95%).	47
5.15	Localização da região conforme a resolução do domínio D01 a D03.	51
5.16	Apresenta os valores médios diários de concentração de ozônio O_3 , medidos em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e dióxido de nitrogênio NO_2 , também em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no eixo y. No eixo x, são representados os dias do mês de março de 2015. Esses valores foram obtidos a partir dos dados simulados e observados, coletados em todas as estações de monitoramento durante o período indicado.	54
5.17	Apresenta os valores médios diários de concentração de MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para o mês de março de 2015. Esses valores foram obtidos a partir dos dados simulados e observados coletados em todas as estações de monitoramento.	55
5.18	O campo de concentração horizontal, com os valores médios diários de MP10 para a RMS, durante o mês de março de 2015.	58
5.19	O campo de concentração horizontal, com os valores médios mensal de MP10 para a Região Metropolitana de Salvador durante todo o mês de março de 2015	60
5.20	Vetores do campo horizontal do vento na superfície em uma grade de 204 km x 204 km na RMS utilizando intervalos de 30 minutos para cálculo das médias no dia 31/03/2015.	62
5.21	Médias das concentrações ao nível do solo no dia 31/03/2015 para MP10 utilizando o modelo WRF/Chem	63

Lista de Siglas

PPGMCTI ..	Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial
WWW	World Wide Web
RMS	Região Metropolitana de Salvador
RMV	Região Metropolitana de Vitória
WRF/Chem	<i>Weather Research and Forecasting with Chemistry</i>
DFA	<i>Detrended Fluctuation Analysis</i>
ρ_D CCA	<i>Detrended Cross-Correlation Coefficient Analysis</i>
DCCA	Coefficiente de correlação cruzada
IEMA	Instituto Estadual do Meio Ambiente
CMAQ	<i>Community Multi-scale Air Quality Model</i>
MQAr	Modelos de qualidade do ar
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
OMS	Organização Mundial de Saúde
MP	Material particulado
O ₃	Ozônio
MP _{2.5}	Material particulado com partículas em suspensão com diâmetros menores ou iguais a 2.5 micrômetro
MP ₁₀	Material particulado com partículas em suspensão com diâmetros menores ou iguais a 10 micrômetro
NO _x	Óxidos de nitrogênio
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA
λ	Comprimento de onda
Nmse	Erro quadrático Médio Normalizado
F _b	Desvio Fracional
F _s	Desvio Padrão Fracional
FAT2	Representa a fração de dados que estão entre $0.5 \leq (C_p/C_o) \leq 2$
Cor	Coefficiente de Correlação
CLP	Camada limite planetária
CLC	Camada limite Convectiva
CCI	Camada de Convecção Livre
CS	Camada Superficial
CLE	Camada Estável
CR	Camada Residual
ZE	Camada Interfacial de Entranhamento ou Zona de Entranhamento
NMM	<i>Mesoscale Model</i>
MCIP	<i>Meteorology-Chemistry Interface Processor</i>
MOZCART ..	<i>Model for Ozone and Associated Chemical Tracers</i>
GOCART ...	<i>Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport</i>
MEGAN	<i>Model of Nature's Gas and Aerosol Emissions</i>
ANTHRO_EMIS	Ferramenta emissões antropogênico
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

Introdução

A Organização Mundial de Saúde (OMS) identifica a poluição atmosférica como o maior risco ambiental para a saúde nos dias de hoje. Contudo, o monitoramento da qualidade do ar não é um requisito legal em pelo menos 40 % dos países, mas mesmo quando existem leis as normas variam e estão muitas vezes em desacordo com as diretrizes [WHO \(2021\)](#). Dessa forma, os instrumentos de simulação que podem ajudar a estimar o campo de concentração superficial dos poluentes são de grande importância para a formulação de políticas públicas para proteger a saúde da população em geral. Neste contexto, os modelos de qualidade do ar (MQAr) promovem estudos e uma avaliação completa da qualidade do ar numa região, correlacionando a informação sobre a emissão de poluentes com fatores de dispersão e processos químicos, determinando a variação temporal e espacial dos poluentes. Assim, a modelagem da poluição atmosférica pode ser definida como uma ferramenta numérica que descreve uma relação causal entre emissões, meteorologia, concentrações, deposição e outros fatores que afetam a dinâmica de dispersão e concentração de poluentes num determinado espaço geográfico, onde um dos poluentes mais importantes é o material particulado (MP), o qual tem impactos adversos na saúde humana ([OSTRO *et al.*, 2006](#); [GONG *et al.*, 2022](#); [KITAGAWA *et al.*, 2022](#)).

Os MQAr dividem-se em duas grandes categorias: modelos não acoplados (modelos *offline*), em que a meteorologia é calculada separadamente do modelo químico, e modelos em que a meteorologia e a química estão acopladas (modelos *online*) [Zhang \(2008\)](#). Assim, estes modelos são importantes e permitem ajudar o sistema de gestão da qualidade do ar desde a formulação até sua avaliação e adequação. Entre os MQAr de escala regional, os mais proeminentes no cenário mundial são os sistemas de modelos numéricos WRF/Chem (*Weather Research and Forecasting with Chemistry*) e WRF/CMAQ (*Community Multi-scale Air Quality Model*), onde o modelo meteorológico WRF é considerado o estado da arte em modelos de previsão numérica do tempo ([SKAMAROCK; KLEMP, 2008](#)).

O sistema de modelagem WRF/Chem é uma integração *online* do WRF padrão com o objetivo de fornecer uma ferramenta numérica melhorada para as necessidades de investigação e avaliação da qualidade do ar [Peckham \(2012\)](#). O sistema de modelagem WRF/CMAQ também tem sido amplamente utilizado e recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA) e é também capaz de modelar múltiplos contaminantes atmosféricos [Binkowski & Roselle \(2003\)](#). Atualmente, existe uma vasta literatura que utiliza estes modelos na determinação da qualidade do ar em algumas regiões ([HEM-BECK *et al.*, 2022](#); [LI *et al.*, 2022](#); [WANG *et al.*, 2022](#); [SPYROU *et al.*, 2022](#); [SHUKLA *et al.*, 2022](#); [AZMI; SHARMA; NAGAR, 2022](#)).

Contudo, as obras que comparam o desempenho de ambos os modelos não são abundantes na literatura. No trabalho de [Wilczak *et al.* \(2009\)](#) foi avaliada a capacidade do sistema NMM/CMAQ (Mesoscale Model-Community Multi-scale Air Quality Model) e WRF/Chem para simular a meteorologia observada e o ozônio de superfície. Os modelos têm um viés negativo para valores muito elevados de ozônio que ocorrem principalmente em Houston e Dallas (EUA), o que sugere que as emissões urbanas e/ou a química estão mal representadas nos modelos.

Em [Lee, Lee & Kim \(2019\)](#) mostraram múltiplas simulações da qualidade do ar utilizando os modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ na região da Coreia do Sul, com ambos os modelos subestimando a concentração de NO_x.

Em [Chang *et al.* \(2020\)](#), usando os modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ, mostraram que os fluxos de deposição seca de componentes de azoto ativo típicos sobre a China oriental mostraram incertezas entre os resultados de azoto oxidado dos modelos e a rede de observação, enquanto os resultados da simulação de azoto reduzido são subestimados.

No entanto, como acima referido, a literatura ainda carece de comparações entre modelos levando em conta as partículas em suspensão. Por exemplo, [Matsui *et al.* \(2009\)](#) avaliaram as variações espaciais e temporais de MP2.5 em torno de Pequim utilizando os modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ. Neste estudo, embora o modelo WRF/Chem tenha mostrado um desempenho semelhante ao do WRF/CMAQ, foram previstas sistematicamente maiores concentrações de espécies primárias na superfície, sugerindo algumas inconsistências entre os modelos no cálculo dos processos de mistura dentro da camada limite planetária (PBL).

Em [Zhang *et al.* \(2016\)](#) compararam os desempenhos do modelo WRF/Chem e do modelo MM5/CMAQ para a Ásia Oriental. O modelo MM5/CMAQ superou o modelo WRF/Chem na simulação de variáveis meteorológicas na Coreia do Sul e Japão, enquanto ambos os modelos subestimaram a concentração de MP2.5 em Taiwan.

Em [Choi *et al.* \(2019\)](#), ao comparar os modelos, mostraram que o WRF/Chem na previsão média diária de MP2.5 superou o modelo WRF/CMAQ, onde também foram identificadas discrepâncias de ambos os modelos na composição química de MP2.5, bem como na concentração total. O modelo WRF/Chem mostrou um acoplamento mais consistente entre a meteorologia simulada e as concentrações de MP2.5 do que o modelo WRF/CMAQ, que foi identificado pela maior correlação entre as variáveis meteorológicas simuladas e MP2.5, bem como nas medições de superfície.

O nível de concentração de poluentes atmosféricos (gases e partículas) está correlacionado com a combinação de variáveis meteorológicas de uma dada região. Por conseguinte, a

concentração de poluentes atmosféricos e os dados meteorológicos devem ser avaliados estatisticamente para verificar as suas correlações, sendo um tópico importante nos problemas de dispersão atmosférica. Neste sentido, a dinâmica dos fenômenos naturais é caracterizada por correlações de longo alcance, onde a função de autocorrelação varia de acordo com uma lei de potência.

Em [Tsonis, Roebber & Elsner \(1999\)](#), [Glahn *et al.* \(2009\)](#). Assim, a aplicabilidade da modelagem matemática na descrição e interpretação destas dinâmicas constitui uma ferramenta valiosa para a resolução de problemas reais e para as tomadas de decisões [Penereiro & Ferreira \(2012\)](#).

Especificamente, determinar uma correlação de longo prazo entre emissões poluentes (as concentrações de poluentes são as consequências das emissões) e mudanças ambientais exige a compreensão de processos não estacionários, tais como padrões de circulação global e tendências de aquecimento [Kurnaz \(2004\)](#).

Desta forma, o método DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) foi desenvolvido para extrair correlação de longo alcance em séries temporais não estacionárias [Peng *et al.* \(1994\)](#), tornando-se uma ferramenta importante para a compreensão de processos complexos. Foi aplicado em estudos centrados em vários tópicos, incluindo o comportamento da temperatura ambiental [Koscielny-Bunde *et al.* \(1998\)](#), velocidade do vento [Kavasseri & Nagarajan \(2004\)](#), [Koçak \(2009\)](#), [Santos, Stosic & Stosic \(2012\)](#), [Anjos *et al.* \(2015\)](#), precipitação [Matsoukas, Islam & Rodriguez-Iturbe \(2000\)](#), humidade relativa ([CHEN; LIN; FU, 2007](#)) e o Índice de Oscilação do Atlântico [Caldeira, Fernández & Pacheco \(2007\)](#).

Por outro lado, o modelo estatístico ρ_{DCCA} (*Detrended Cross-Correlation Coefficient Analysis*), por sua vez, foi desenvolvido para avaliar as correlações cruzadas entre pares de séries temporais não estacionárias [Zebende & Guedes \(2022\)](#). Se comparado, por exemplo, com o coeficiente de Pearson, é um modelo robusto [Kristoufek \(2014\)](#).

Alguns trabalhos, tais como [Kwapień, Oświęcimka & Drożdż \(2015\)](#) aplicaram o ρ_{DCCA} em dados empíricos altamente complexos dos mercados financeiros. Em [Zebende & Filho \(2018\)](#), [Ferreira & Pereira \(2019\)](#), [Ferreira *et al.* \(2019\)](#), analisa-se como as variáveis meteorológicas externas estão relacionadas, como é proposto neste trabalho com o ρ_{DCCA} múltiplos coeficientes de correlação cruzada. Em [Brito, Araújo & Zebende \(2019\)](#), são analisadas as correlações cruzadas entre três variáveis meteorológicas ao mesmo tempo; em [Marinho, Sousa & Andrade \(2013\)](#) é investigada a correlação cruzada ρ_{DCCA} para identificar e caracterizar dados correlacionados obtidos de poços de petróleo perfurados. [Wang *et al.* \(2014\)](#) é adoptado o método do coeficiente de correlação cruzada DCCA para quantificar as correlações cruzadas entre os mercados energéticos e as emissões. Os vários estudos mostram que a análise dos dados ao longo do tempo permite orientar as ações de controle. Desta forma, a persistência é avaliada, uma vez que as séries persistentes tendem a aumentar ao longo do tempo, de modo que, se as concentrações de poluentes mostrarem

uma tendência crescente, os riscos da qualidade do ar aumentarão o que pode, portanto, afetar a saúde humana. Neste sentido, a literatura é ainda incipiente para correlacionar a concentração de poluentes atmosféricos e variáveis meteorológicas, tal como proposto neste trabalho. Portanto, a compreensão dos padrões e tendências da poluição atmosférica é primordial para prever, avaliar e mitigar os seus impactos nos sistemas sociais, econômicos e ambientais.

Com base no exposto anteriormente, tem-se a seguinte estrutura lógica a ser seguida para este trabalho: i) Comparação entre o sistema WRF/Chem e o WRF/CMAQ para analisar a dispersão de MP na região metropolitana de Vitória (RMV), onde existe um inventário de fontes consolidado, resultado de um esforço do IEMA (Instituto Estadual do Meio Ambiente) (<https://iema.es.gov.br/qualidadedoar/inventariodefontes>). Esta comparação é importante para verificar se o modelo proposto neste trabalho poderá reproduzir de forma satisfatória a dispersão de poluentes na região metropolitana de Salvador (RMS), analisando o inventário local proposto por [Silva et al. \(2021\)](#). ii) Investigação da evolução dos poluentes medidos ao longo do tempo (um ano) e a sua relação com quatro variáveis climáticas (irradiação solar, temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do vento) utilizando as técnicas de DFA e ρ_{DCCA} na RMS, no Porto de Aratu, onde existem dados consistentes para o ano de 2019. iii) Avaliação do modelo WRF/Chem na RMS analisando os dados do inventário local, com particular atenção aos casos de entrada de brisa, dos poluentes O₃, NO_x e MP.

1.1 Hipóteses da pesquisa

- O modelo WRF/Chem consegue simular adequadamente os processos físicos e químicos na RMS de forma servir como ferramenta auxiliar para a gestão ambiental.

1.2 Objetivo geral

- Avaliar o desempenho do modelo de qualidade do ar WRF/Chem para a determinação do campo de concentração dos poluentes O₃, NO_x e MP na RMS.

1.2.1 Objetivos específicos

- Tratar os dados das variáveis meteorológicas e de poluentes das estações de coleta;
- Realizar simulações de MP com os modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ na RMV;

- Comparar o modelo WRF com os dados meteorológicos das estações na RMV e RMS;
- Comparar os resultados do modelo WRF/Chem com dados medidos de concentração na RMS;
- Aplicar as técnicas DFA e ρ_{DCCA} nos dados medidos nas estações de qualidade do ar na RMS .

Este documento apresenta 6 capítulos e está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Fornece a motivação e os objetivos do trabalho.
- **Capítulo 2 - Revisão bibliográfica:** Apresenta uma revisão bibliográfica do trabalho realizado na área do tema abordado.
- **Capítulo 3 - Camada Limite Planetária (CLP):** Expõe uma breve revisão da estrutura da camada limite planetária (CLP).
- **Capítulo 4 - Metodologia:** Ilustra a utilização de WRF/Chem modelo de qualidade do ar usando inventários local e global em duas regiões costeiras.
- **Capítulo 5 - Resultados numéricos:** Comparam-se os dados medidos e simulados com os modelos de qualidade do ar, apresentando as devidas discussões.
- **Capítulo 6 - Conclusões :** Apresenta as conclusões das simulações da concentração de poluentes na RMV e RMS, além da influência de longo prazo e correlação entre as concentrações de poluentes e variáveis meteorológicas na RMS.

Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sucinta sobre os modelos de qualidade do ar empregados na tese, bem como alguns trabalhos importantes sobre o efeito da brisa marítima na dispersão de poluentes atmosféricos, além dos métodos de persistência e correlação cruzada usados na avaliação dos dados na RMS.

2.1 Modelos de qualidade do ar (MQAr)

Os modelos de qualidade do Ar (MQAr) promovem estudos minuciosos e uma avaliação completa da qualidade do ar em uma região. Os MQAr correlacionam informações sobre a emissão de poluentes com fatores de dispersão e processos químicos, determinando a variação temporal e espacial dos poluentes. Neste sentido, a modelagem pode ser definida como uma ferramenta numérica que descreve uma relação causal entre emissões, meteorologia, concentrações atmosféricas, deposição e outros fatores que afetam a dinâmica de dispersão e concentração de poluentes em determinado espaço geográfico [Pedruzzi et al. \(2019\)](#), [Ma et al. \(2019\)](#), [Dafka et al. \(2021\)](#), [Sokhi et al. \(2021\)](#), [Biswal et al. \(2021\)](#), [Azmi, Sharma & Nagar \(2022\)](#), [Hembeck et al. \(2022\)](#), [Adhikari & Mejia \(2022\)](#), [Jorquera & Villalobos \(2022\)](#), [Jin et al. \(2022\)](#).

Neste contexto, o modelo WRF é um modelo meteorológico Euleriano tridimensional que resolve um conjunto de equações de conservação prognósticas para massa, momento, energia e umidade e processos físicos atmosféricos associados, como transferência radiativa de ondas curtas e longas, mistura turbulenta da camada limite planetária, interações superfície-atmosfera e precipitação [Skamarock et al. \(2008\)](#).

O modelo WRF/Chem [Peckham \(2012\)](#) é um modelo Euleriano tridimensional *online* de qualidade do ar que calcula processos de emissões antropogênicas e biogênicas, processos de transporte e transformação química, deposições secas e úmidas de espécies gasosas e aerossóis em modo interativo com o modelo WRF. O modelo WRF/Chem é capaz de simular a interação fotoquímica com processos de meteorologia, radiação, e feedback atmosférico [Fast et al. \(2006\)](#), [Chapman et al. \(2009\)](#). O WRF/Chem tem sido utilizado com sucesso em todo o mundo para estudar as emissões locais e interação do aerossol [Andreão, Albuquerque & Kumar \(2018\)](#), [Andreão et al. \(2020\)](#), [Andreão & Albuquerque \(2021\)](#), [Ibarra-Espinosa et al. \(2022\)](#), [Zhao et al. \(2022\)](#).

Os MQAr se dividem em duas grandes categorias: modelos não acoplados *offline* como WRF/CMAQ na simulação de MP2.5 e MP10 ou O3 usando um inventário local desenvolvido pela agência ambiental IEMA [Pedruzzi et al. \(2019\)](#), [Kitagawa et al. \(2021\)](#),

Kitagawa *et al.* (2022), Qi *et al.* (2023) na região metropolitana de Vitória (MRV), Brasil, nos quais a meteorologia é calculada separadamente do modelo químico, e modelos *online*, na qual a meteorologia e a química são acopladas Zhang (2008), Georgiou *et al.* (2022), Vélez-Pereira, Linares & Belmonte (2022), Fang *et al.* (2022).

Assim, esses modelos são importantes e permitem auxiliar o sistema de gestão de qualidade do ar desde sua formulação até sua avaliação e adequação. Dentre os modelos meteorológicos o que mais vem se destacando no cenário mundial é o modelo WRF (*Weather Research and Forecasting model*). O WRF é considerado o estado da arte em modelos numéricos Skamarock *et al.* (2008), Ye *et al.* (2021), Kitagawa *et al.* (2022), Li *et al.* (2022), Sánchez-Ccoyllo *et al.* (2022), Seaton *et al.* (2022), Chate, Beig *et al.* (2022). O WRF/Chem (*Weather Research and Forecasting Model with Chemistry*), objeto deste trabalho, é uma integração online do WRF padrão com o objetivo de fornecer uma ferramenta numérica aprimorada para pesquisas e necessidades de avaliação da qualidade do ar.

2.2 Os métodos DFA e ρ_{DCCA}

O método DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) foi desenvolvido para extrair correlação de longo alcance em séries temporais não estacionárias Peng *et al.* (1994), Santos *et al.* (2022), tornando-se um instrumento importante para a compreensão de processos tão complexos. Esta metodologia foi aplicada em estudos centrados em vários tópicos, incluindo o comportamento da temperatura ambiental Koscielny-Bunde *et al.* (1998), velocidade do vento Kavasseri & Nagarajan (2004), Koçak (2009), Santos, Stosic & Stosic (2012), Anjos *et al.* (2015), precipitação Matsoukas, Islam & Rodriguez-Iturbe (2000), humidade relativa Chen, Lin & Fu (2007) e o Índice de Oscilação do Atlântico Norte Caldeira, Fernández & Pacheco (2007).

Por outro lado, o modelo estatístico ρ_{dcca} (*Detrended Cross-Correlation Coefficient Analysis*), foi desenvolvido para avaliar as correlações cruzadas entre pares de séries temporais não estacionárias Zebende (2011), Zebende *et al.* (2021), Zebende & Guedes (2022). Se comparado, por exemplo, com o coeficiente de Pearson, ele é robusto Kristoufek (2014). Alguns trabalhos, tais como Kwapien, Oświęcimka & Drożdż (2015), aplicaram o ρ_{dcca} a dados empíricos altamente complexos dos mercados financeiros; Zebende & Filho (2018), Ferreira & Pereira (2019), Ferreira *et al.* (2019), analisa-se como as variáveis meteorológicas externas estão relacionadas, como é proposto neste trabalho com o ρ_{DCCA} múltiplos coeficientes de correlação cruzada; Brito, Araújo & Zebende (2019), são analisadas as correlações cruzadas entre três variáveis meteorológicas ao mesmo tempo; Marinho, Sousa & Andrade (2013), ρ_{DCCA} é aplicado para identificar e caracterizar dados correlacionados obtidos de poços de petróleo perfurados; Wang *et al.* (2014), o método ρ_{DCCA} dos coeficientes de correlação cruzada é adoptado para quantificar as correlações cruzadas entre os mercados energéticos e as emissões, conforme Zhao, Shang & Huang (2017) estabeleceu

uma relação bem definida entre αDFA (o expoente de correlação automática de longo alcance) e $\gamma DCCA$ (o expoente de correlação cruzada de longo alcance), descrita pelos métodos DFA e DCCA, respectivamente, conforme [Podobnik & Stanley \(2008\)](#) estudaram teoricamente várias propriedades fundamentais do coeficiente de correlação cruzada DCCA, o que contribui para adquirir mais características estatísticas desta medida. [Vassoler & Zebende \(2012\)](#) investigações sobre as correlações cruzadas entre diferentes séries temporais registadas simultaneamente na presença de não estacionária, segundo [Zebende & Filho \(2018\)](#), [Toledo et al. \(2022\)](#) analisou e quantificou a correlação cruzada entre os dados climatológicos, adoptando os coeficientes de correlação cruzada DCCA e ρ_{DCCA} . Em [Silva et al. \(2014\)](#), a correlação cruzada entre a temperatura do ar e a humidade relativa é estudada utilizando o coeficiente de correlação cruzada DCCA. Além disso, [Zebende & Filho \(2018\)](#) propôs o estabelecimento de um coeficiente de correlação cruzada múltipla alargado, e [Brito, Araújo & Zebende \(2019\)](#) analisou as correlações cruzadas em séries temporais não estacionárias.

Vários estudos mostram que a análise dos dados ao longo do tempo permite orientar as ações de controle. Desta forma, a persistência é avaliada, uma vez que as séries persistentes tendem a aumentar ao longo do tempo, de modo que se as concentrações de poluentes mostrarem uma tendência crescente, os riscos da qualidade do ar aumentarão, o que pode, portanto, afetar a saúde humana.

Neste sentido, a literatura é ainda incipiente para correlacionar a concentração de poluentes atmosféricos e variáveis meteorológicas, tal como proposto neste trabalho. A compreensão dos padrões e tendências da poluição atmosférica é primordial para prever, avaliar e mitigar os seus impactos nos sistemas sociais, económicos e ambientais [Palmeira et al. \(2022\)](#).

2.3 Brisa Marítima

Ao longo das regiões costeiras, a camada limite planetária tem um comportamento interno diferente, devido ao diferencial térmico entre o mar e a terra, variações diárias que podem alterar significativamente a circulação local. Assim, a dinâmica da camada limite térmica interna (CLI), que é formada pela brisa do mar, tem sido estudada por diversos pesquisadores, incluindo [Muppa et al. \(2012\)](#), [Salvador et al. \(2016b\)](#), [Salvador et al. \(2016a\)](#), [Torres-Freyermuth et al. \(2017\)](#), [Anjos & Lopes \(2019\)](#), [Reddy et al. \(2020\)](#), [Anjos et al. \(2020\)](#), [He, Ding & Prasad \(2020\)](#), [Ferdiansyah, Inagaki & Kanda \(2020\)](#), [Shen, Zhao & Yang \(2021\)](#), [Zhao et al. \(2022\)](#), [Williams et al. \(2022\)](#), [Liu et al. \(2022\)](#), [Aravind et al. \(2022\)](#), [Souza, Nascimento & Moreira \(2023\)](#).

Nestes estudos, além da visualização específica do fenómeno, em que a influência da brisa do mar na circulação local mostra afetar a dispersão dos poluentes, são avaliados modelos matemáticos para fazer previsões sobre essas circulações, principalmente estudos sobre a influência dos poluentes. Os poluentes são transportados por longas distâncias por um

campo de vento de grande escala, e sua dispersão é o resultado de um conjunto de vórtices de múltiplas dimensões gerados por desequilíbrios em grandes escalas por diversos fatores, como diferenciais térmicos, terreno, tipos e uso de solos etc. [Stull \(1988\)](#). Tais fatores geram turbulências e movimentos em menor escala, que têm papel importante na dispersão dos poluentes atmosféricos. No entanto, outros fatores, como a brisa do mar, podem ocasionalmente contribuir para o aumento das concentrações de poluentes, causando incômodos e danos à saúde para os indivíduos que vivem perto das fontes de emissão [Borrego *et al.* \(2010\)](#).

Neste trabalho, apresenta-se somente um estudo de caso de entrada de brisa marítima. Importante ressaltar a inexistência de dados observados obtidos com diferentes equipamentos de medição (LIDAR e/ou SODAR, por exemplo). Ressalta-se que a literatura também apresenta muitos artigos que usam apenas um dia de análise para estudos da brisa do mar [Chiba \(1997\)](#), [Gilliam, Raman & Niyogi \(2004\)](#), [Talbot *et al.* \(2007\)](#), [Dandou, Tombrou & Soulakellis \(2009\)](#), [Challa *et al.* \(2009\)](#), [Kala *et al.* \(2010\)](#), [Tomasi, Miglietta & Perrone \(2011\)](#), [Chemel & Sokhi \(2012\)](#), [Ryu, Baik & Han \(2013\)](#), [Azorin-Molina *et al.* \(2015\)](#), [Varquez, Nakayoshi & Kanda \(2015\)](#), [Augustin *et al.* \(2020\)](#), [Arrillaga *et al.* \(2020\)](#), [Yoon, Lim & Park \(2021\)](#), [He *et al.* \(2022\)](#). Portanto, este estudo de caso é um exercício de avaliação em uma região costeira.

Camada Limite Planetária (CLP)

3.1 Estrutura da atmosfera

A atmosfera do nosso planeta é formada por uma camada de ar envolvida por gases, vapor d'água e particulados. Essa atmosfera é composta por: Troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. No âmbito desta pesquisa, os estudos se concentram focando a troposfera. Logo, por Troposfera, entende-se a camada com menor distância da superfície da terra, com dimensão variando entre 9 a 16 km onde se observa os fenômenos de interesse meteorológico. No entanto, a dispersão de poluentes se dá dentro da CLP, região mais próxima da superfície da Terra.

3.2 Camada limite planetária

A concentração de poluentes em uma determinada região se deve em grande parte às condições meteorológicas locais. Por isso, para a avaliação da dispersão de poluentes é imprescindível o conhecimento dos fenômenos que regem a atmosfera. A troposfera pode ser dividida em duas partes: uma camada adjacente à superfície terrestre, chamada Camada Limite Planetária (CLP), e a camada acima desta, chamada Atmosfera Livre, como pode ser visto na Figura 3.1 .

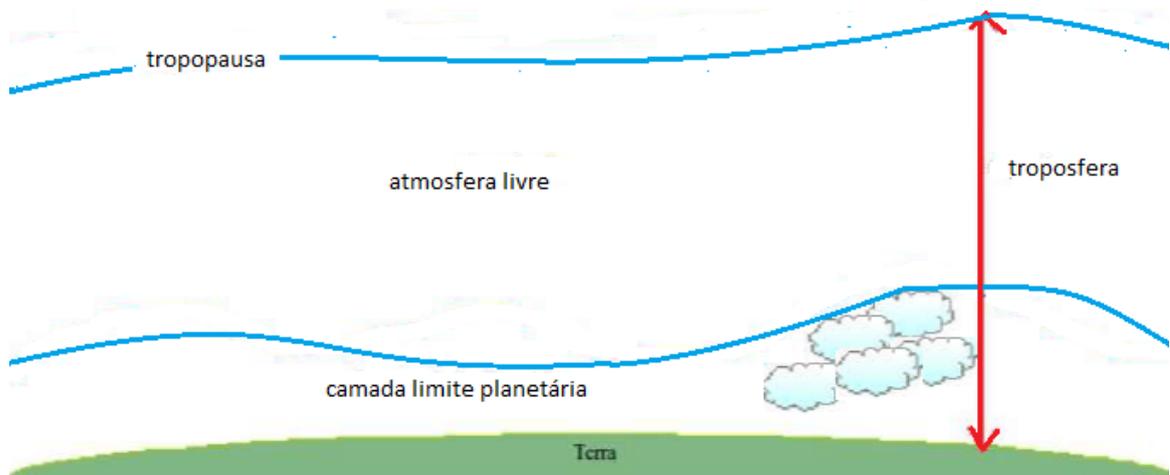


Figura 3.1: Divisão da troposfera.
Fonte: ??)

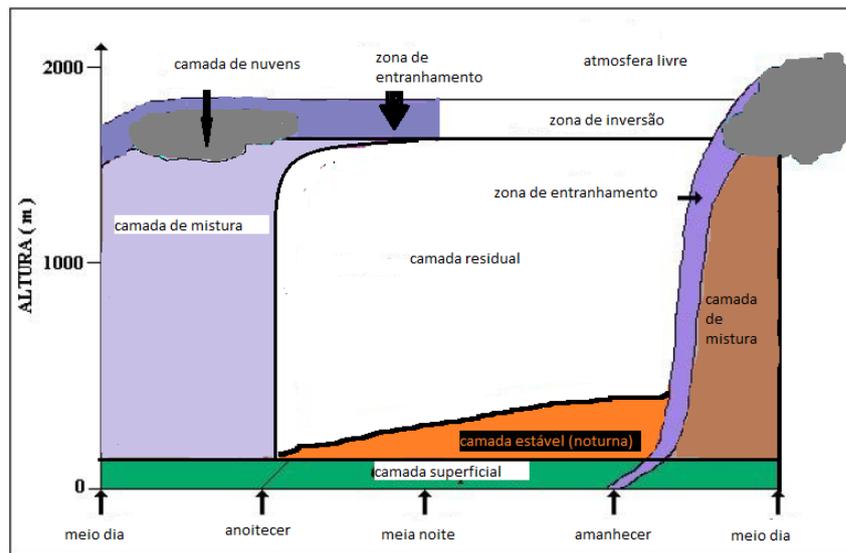
A parte da atmosfera que é influenciada diretamente pela superfície da terra e que res-

ponde a forçantes superficiais, tais como os fluxos de calor e umidade, forças de atrito, evaporação e transpiração, emissão de poluentes e modificação de fluxo induzida pelo terreno, em uma escala de tempo de uma hora ou menos é denominada Camada Limite Planetária (CLP).

A espessura da CLP varia de 100 m a 3000 m de altura a partir da superfície e é uma função direta dos forçantes térmicos e mecânicos (produção de turbulência pode ocorrer por empuxo e/ou cisalhamento do vento). A variação diurna de temperatura na CLP é uma de suas principais características, sendo assim esta variação é provocada pelo aquecimento e resfriamento da superfície da terra. A radiação de onda longa, proveniente do solo que absorve cerca de 90 % da radiação nos dias ensolarados, faz com que a variação diurna seja bastante acentuada próximo ao solo e não ocorre a grandes altitudes. As massas de ar quente que se elevam a partir da superfície (gradiente de transporte positivo) são chamadas termas, turbilhões ou vórtices.

Nessa camada, os ventos médios são responsáveis pelo transporte horizontal rápido (advecção) das espécies como umidade, calor, *momentum* e os poluentes. Estes ventos variam normalmente entre 2 a 10 m/s. Já o transporte vertical é dominado pela turbulência que é constituída de vários turbilhões que se sobrepõem e cujos tamanhos são variáveis (da ordem de 1 mm a 3000 m de diâmetro), a seguir a figura 3.2 ilustra a evolução temporal da CLP.

Figura 3.2: Evolução temporal da CLP.



A soma das contribuições de todos estes turbilhões constitui o espectro de energia turbulenta. Sobre a superfície do solo em regiões de alta pressão a camada limite tem uma estrutura bem definida que envolve um ciclo diurno de acordo com os processos físicos que nela ocorrem na Figura 3.2.

3.3 Camada Limite Convectiva

A Camada Limite Convectiva (CLC) ou condição instável, é gerada pelo aquecimento diurno da superfície, alcança altura de 100-2000m a partir do solo.

Esta camada se constitui após a alvorada, tem início no momento em que o chão aquece, o qual por condução aquece o ar em contato com ele. Este ar aquecido é mais leve que o ar adjunto (mais frio) e, se inclina a subir; enquanto o ar mais frio se inclina a descer (fluxo de calor positivo) procedendo a convecção térmica.

Além disso, a pluralidade das fontes poluidoras está vizinha do solo, deste modo os contaminantes concentrados podem ampliar consideravelmente na CLC, pois estes poluentes estão sendo transportados por turbilhões e pelas termas (massa de ar quente que se eleva a partir do solo). Durante o decorrer do dia, as termas vão alcançando níveis ainda maiores.

A CLP é definida como a região da atmosfera que se inicia do solo $z = 0$ até onde o fluxo de calor se torna negativo $z = h$. Nesta região, a taxa de variação da temperatura potencial é negativa, ou seja, a temperatura potencial diminui com a altura. Nesta região a turbulência é intensificada. Quando $z = h$ a temperatura potencial começa a aumentar. Pode-se determinar a CLP desmembrada em quatro camadas: camada superficial, camada de convecção livre, camada de mistura e camada interfacial de estranhamento.

3.3.1 Camada Superficial (CS)

A Camada Superficial demonstra uma grande taxa de variação de temperatura e velocidade e o fluxo turbulento é sensivelmente constante, no qual a turbulência mecânica (cisalhamento do vento) é marcante. É reservada a alturas menores do que $Z \leq [L]$, onde L é o comprimento de Monin-Obukhov, determinado por:

$$L = \frac{u_*^3}{k \frac{g}{\theta} (\overline{w\theta})_0} \quad (3.1)$$

Onde θ é a temperatura potencial média, $(\overline{w\theta})_0$ é o fluxo de calor turbulento na superfície, u_* é a velocidade de fricção na superfície, k é a constante de Von Kármán e g é a aceleração da gravidade.

Segundo [Panofsky & Dutton \(1984\)](#), uma CLC é considerada bem desenvolvida quando $[L]$ apresenta valores típicos entre 10 e 100m, de modo que $h/[L] \geq 10$. Desta forma, essa razão pode ser considerada um parâmetro de estabilidade, pois retrata o papel da turbulência de cisalhamento do vento.

- Convecção fraca: $h/[L] < 5$;
- Convecção moderada: $5 < h/[L] < 10$;
- Convecção alta: $h/[L] > 10$;

3.3.2 *Camada de Convecção Livre (CCL)*

Nesta camada ocorre a transformação compreendida entre a Camada Superficial e a Camada de Mistura. A CLC está entre $[L] < z < 0.1h$, nesta camada a velocidade, não é importante, mas a escala z ainda é. Efetivamente u^* nunca chega à zero na prática, mas a condição de convecção livre local determina a escala da estrutura da turbulência [Williams & Hacker \(1993\)](#).

3.3.3 *Camada Interfacial de Entranhamento ou Zona de Entranhamento (ZE)*

Camada compreendida na crista da CLP, junto da atmosfera livre e a CM. A Zona de Entranhamento é a região de ar estaticamente estável na crista da camada de mistura, onde há entranhamento de ar da atmosfera livre abaixo e penetração convectiva das plumas térmicas para cima. Esta zona é caracterizada pela transformação térmica e por restringir os movimentos da Camada de Mistura (CM).

3.4 *Camada Residual (CR)*

O processo de declínio dos elevados turbilhões tem início na CR, constituindo a CLC. Este fenômeno tem ocorrência entre 20 min e 60 min anterior ao pôr-do-sol. A turbulência nesta secção é gerada por convecção ao longo do dia, e a energia é aproximadamente análoga em suas direções, ocasionando deste modo plumas dentro da CR.

3.5 *Camada Limite Estável (CLE)*

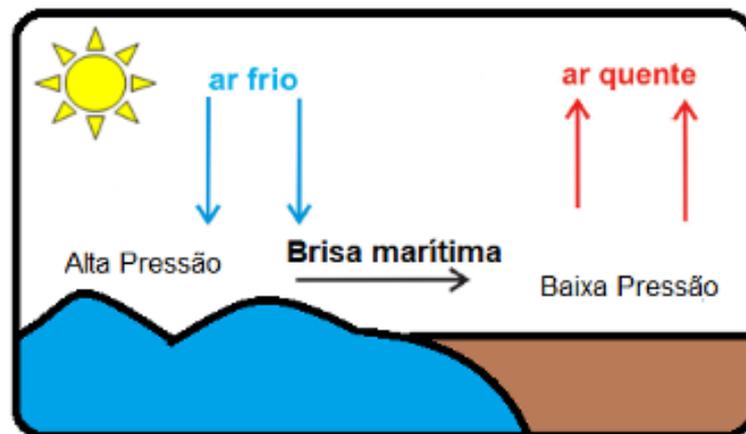
A Camada Limite Estável (CLE) ou camada noturna aparece antes do pôr-do-Sol. Constitui-se pelo resfriamento noturno da superfície terrestre. Neste resfriamento se provoca um fluxo de calor menor que zero, e remove a energia cinética dos elevados turbilhões. Logo,

as plumas emissoras na CLE se dispersam suavemente na vertical e mais acelerado na horizontal e tem uma turbulência enfraquecida. Nesta camada atinge-se altura de 100-300m e é composta por pequenos turbilhões.

3.6 A Camada Limite Interna e a brisa marítima

A brisa marítima é um fenômeno local originada devido a um aquecimento/resfriamento mais rápido do solo em relação ao mar [Aravind et al. \(2022\)](#), [He et al. \(2022\)](#), [Souza, Nascimento & Moreira \(2023\)](#). As nomenclaturas para estes ventos locais estão sempre associadas as suas respectivas regiões de origem. Por exemplo, na brisa marítima os ventos têm origem no mar e na brisa de montanha os ventos originam-se no topo das montanhas [Stull \(2012\)](#). A Figura 3.3 mostra o comportamento físico para ocorrência da brisa marítima.

Figura 3.3: Brisa marítima



Em razão do maior calor específico e ao constante movimento da superfície do mar, quando exposta a uma mesma intensidade de radiação solar, a superfície da terra aquece mais rapidamente do que a superfície da água, promovendo um aquecimento diferenciado do ar sobre o continente, deixando-o relativamente mais quente e leve que o ar sobre o oceano, fazendo com que o ar sobre o continente se desloque para altitudes mais elevadas criando, conseqüentemente, uma região de baixa pressão que, em determinadas condições, pode ser ocupada pelo ar mais frio proveniente da superfície do mar, formando uma grande célula de circulação na direção mar-terra, na baixa troposfera e em sentido inverso, na parte superior. Esse fenômeno é conhecido como brisa marítima. No período da noite, a circulação é invertida, pois o oceano se resfria mais lentamente que a superfície continental, e o gradiente mar-terra provoca o deslocamento da massa de ar continental para o oceano, caracterizando a brisa terrestre [Salvador et al. \(2016b\)](#).

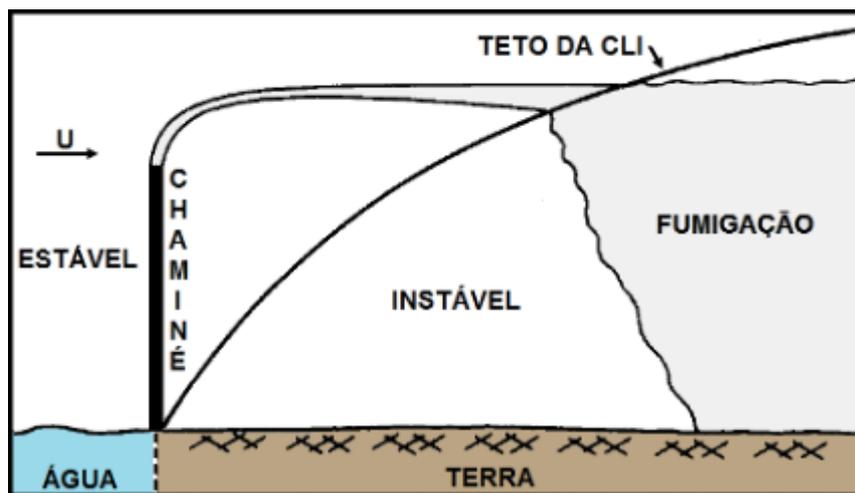
Ao considerar o regime de brisas marítimas em uma região onde a área continental é delimitada por uma linha de costa com o oceano, uma camada limite pode ser formada

em função da mudança das características da região costeira, da diferença de temperatura terra/mar e da intensidade dos ventos durante a brisa [He et al. \(2022\)](#). Esta camada é conhecida como Camada Limite Interna (CLI) e pode surgir ao longo do dia, acima da camada superficial, devido ao aquecimento da massa de ar fria vinda do oceano em direção a superfície [Salvador et al. \(2016a\)](#).

Em condições convectivas, a formação da CLI devido à diferença de temperatura entre superfícies de terra e água surge como resultado da advecção de uma massa de ar (estável) vinda do mar que não se mistura imediatamente com os elementos da massa de ar (instável) sobre a porção continental.

A dinâmica atmosférica não contempla, entre outras singularidades, os efeitos de brisas que ocorrem em regiões próximas a grandes volumes de água, que podem alterar, substancialmente, o comportamento do perfil da atmosfera, criando outra camada de menor temperatura, acima da camada superficial. O esquema mostrado na Figura 3.4 ilustra o processo de fumigação e a dinâmica da brisa marítima, fenômeno responsável pelo aumento da concentração próximo ao solo dos poluentes atmosféricos lançados pelas chaminés.

Figura 3.4: Esquema da brisa marítima e a fumigação



Essa camada fria (devido à brisa marítima), que pode surgir ao longo do dia, consegue adentrar por vários quilômetros sobre áreas próximas da costa, aprisionando os poluentes emitidos na camada superficial ou reintroduzindo os lançados acima desta camada, porém próximos da interface, sendo conhecido como processo de fumigação [Salvador et al. \(2016a\)](#), [Salvador et al. \(2016b\)](#). Este fenômeno tem sido estudado em várias regiões ao redor do mundo a exemplo [Anjos & Lopes \(2019\)](#), [Reddy et al. \(2020\)](#), [He, Ding & Prasad \(2020\)](#), [Ferdiansyah, Inagaki & Kanda \(2020\)](#), [Shen, Zhao & Yang \(2021\)](#), [Williams et al. \(2022\)](#), [Aravind et al. \(2022\)](#) com objetivo de avaliar o impacto do efeito de Brisa marítima na concentração de poluentes.

Metodologia

4.1 Metodologia empregada

4.1.1 Descrição dos dados de pesquisa

A pesquisa propõe a avaliação de uma modelagem matemática do modelo WRF/Chem com o intuito de determinar a concentração dos poluentes O₃, NO_x e MP na RMS. Inicialmente foram realizadas simulações na RMV e RMS analisando-se somente o material particulado. Optou-se pelo modelo WRF/Chem por esse ser um modelo acoplado, possuindo características de captar maior interação da química, além disso é um modelo de ampla utilização na literatura. Convém mencionar que foi utilizado o modelo WRF/Chem no estudo das partículas em suspensão (MP_{2.5} e MP₁₀), com particular atenção a uma região costeira tropical, utilizando um inventário local desenvolvido pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) [Pedruzzi et al. \(2019\)](#), [Kitagawa et al. \(2021\)](#), [Kitagawa et al. \(2022\)](#) na RMV, e outro feito na RMS [Silva et al. \(2021\)](#). Além disso, é de notar que as emissões antropogênicas foram preparadas no sistema SMOKE (*Sparse Matrix Operator Kernel Emissions*). Outro aspecto importante a ser analisado é uma avaliação da influência da brisa marítima na região de estudo [Salvador et al. \(2016b\)](#), [Salvador et al. \(2016a\)](#). Além disto, foi feita uma análise de correlação e persistência entre variáveis meteorológicas e concentração medidas e simuladas pelos modelos.

4.1.2 Coleta de Dados

A coleta de dados para essa pesquisa pautou-se numa revisão de literatura sobre as características topográficas das regiões e configuração das ferramentas de avaliação da qualidade do ar conforme recomendação do desenvolvedor da ferramenta aplicado em regiões com característica similares. A coleta de dados foi baseada em planilhas disponibilizadas pela CODEBA e CETREL. O período coletado e analisado dessas planilhas equivale a um período de cinco anos sendo de 2015 a janeiro de 2020.

Salienta-se que de início foi realizado um levantamento de dados observatórios nos boletins publicados com responsabilidades ambientais do estado da Bahia, tanto na CODEBA, quanto no CETREL. Essas entidades foram selecionadas por apresentarem riqueza e disponibilidades de dados medidos. Convém destacar que a CETREL é a empresa de maior relevância na região metropolitana de Salvador e a CODEBA é uma autoridade portuária que tem por obrigação realizar esse tipo de avaliação por questões econômicas, bem como

sociais.

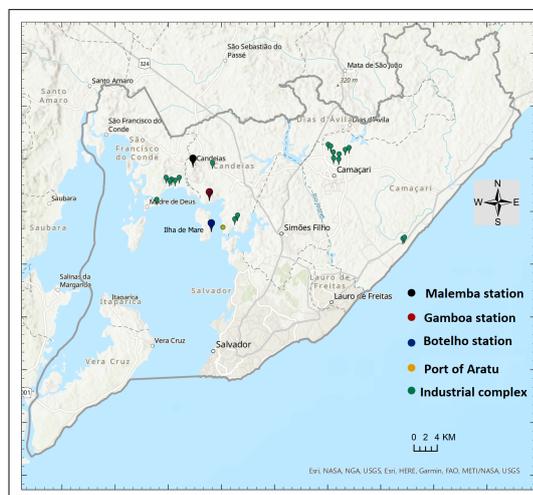
Foram analisados os dados de qualidade do ar da CODEBA em Aratu, referentes ao período de 2016 a 2019, com ênfase no período de 2019 nas regiões Botelho, Gamboa e Malembá, devido à consistência dos dados. Da CETREL, em Salvador, foram analisadas as informações de qualidade do ar em 2015, totalizando o período de 2015 a 2019.

Referente ao IEMA em Vitória foi analisado emissões anuais total de poluentes atmosféricos por setor [IEMA \(2019\)](#).

4.2 Áreas de estudo

A área de estudo concentra-se inicialmente na Região Metropolitana de Salvador (RMS), situada no estado da Bahia, nas latitudes $12^{\circ}20'S$ a $13^{\circ}10'S$ e longitudes $37^{\circ}50'W$ a $38^{\circ}50'W$. Composta por 13 cidades, a RMS abriga aproximadamente 3,6 milhões de habitantes em uma área total de 4.375 km^2 . A região caracteriza-se como urbano-industrial, com configuração peninsular, e inclui uma baía situada a sudoeste da área e a leste do Oceano Atlântico. A Baía de Todos os Santos (BTS), parte integrante da costa brasileira, penetra no continente através de um estreitamento entre Salvador, capital do estado da Bahia, e a ilha de Itaparica. Essa presença marítima aumenta a umidade local devido à evaporação, estabelecendo um clima tropical úmido na região. O período de abril a julho representa a época de maior precipitação, enquanto setembro a dezembro é o período mais seco. A média anual de temperatura e umidade em Salvador é, respectivamente, 26°C e 80% , com velocidades de vento mais elevadas à tarde e mais baixas durante a madrugada e início da manhã, e seu monitoramento da qualidade do ar e meteorologia na RMS é feito pela CETREL, porém na possui inventário de qualidade do ar consolidado.

Figura 4.1: Estações de monitoramento aéreo nas regiões de Botelho, Malembá e Gamboa na Baía de Todos os Santos, Bahia.



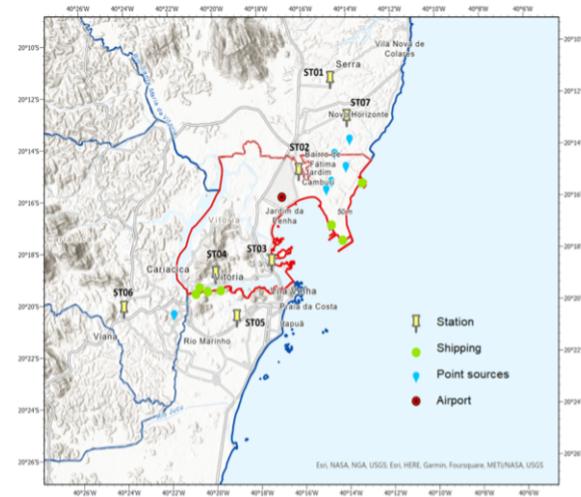
A Figura 4.1 detalha as três estações de qualidade do ar (Malembá, Gamboa e Botelho),

além de algumas fontes fixas (complexo industrial) na região de estudo. Os dados meteorológicos e de poluição atmosférica, objeto deste estudo, são coletados hora a hora de janeiro a dezembro de 2019, período com os dados mais completos disponíveis.

A estação Malembá situa-se numa praça pública de Candeias, região rural com muitas residências. Mais afastada do porto, mas influenciada por fontes móveis, representa uma região mais urbanizada. A estação Gamboa, por sua vez, localiza-se em uma região de Mata Atlântica, pouco habitada e em terreno elevado, a 600 m da costa. A estação de Botelho está situada na praia de Botelho (ilha de Maré), a 2 km via marítima do Porto de Aratu, com grande fluxo de caminhões devido à movimentação de carga.

Além da RMS, a Região Metropolitana de Vitória (RMV), situada no estado do Espírito Santo, representa outra área significativa de estudo. Composta por sete municípios, a RMV possui uma complexa configuração geográfica, incluindo uma mistura de zonas urbanas, industriais e costeiras, conforme a Figura 4.2

Figura 4.2: Localização das sete estações meteorológicas, as principais fontes pontuais e o setor naval na RMV.



A Figura 4.2 mostra RMV, região é banhada pelo Oceano Atlântico e reúne uma população diversificada, abrigando importantes centros comerciais, portos e indústrias. As condições climáticas na RMV são influenciadas tanto por fatores geográficos quanto pela presença de atividades industriais. A média anual de temperatura varia entre 22°C e 28°C, com umidade relativa do ar em torno de 70 %. As estações meteorológicas na RMV estão localizadas em Laranjeiras (ST01), Jardim Camburi (ST02), Enseada (ST03), Centro Vitória (ST04), Ibes (ST05), Cidade Continental (ST06), e Cariacica (ST07). Esses pontos de monitoramento fornecem dados cruciais para a análise das condições ambientais e meteorológicas na região, incluindo aspectos relacionados à poluição do ar e às alterações climáticas. Essa rede de estações contribui para a tomada de decisões em áreas como saúde pública, urbanização e controle ambiental e seu inventário de qualidade do ar desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental local (IEMA) é bem consolidado e

vasta utilização na literatura [Kitagawa *et al.* \(2021\)](#).

Essas duas regiões, RMS e RMV, fornecem um panorama diversificado no nordeste e sudeste do Brasil, representando áreas significativas para estudos meteorológicos e poluição.

4.2.1 Modelos de qualidade do ar

O modelo WRF é um modelo meteorológico Euleriano tridimensional que resolve um conjunto de equações preditivas de conservação de massa, dinâmica, energia e humidade e processos físicos atmosféricos associados, tais como transferência radiativa de ondas curtas e longas, mistura turbulenta da camada limite atmosférica, interações superfície-atmosfera, e precipitação [Skamarock & Klemp \(2008\)](#).

O modelo WRF/Chem é um modelo tridimensional *online* de qualidade do ar Euleriano que calcula os processos de emissão antropogênicos e biogênicos, o transporte químico e os processos de transformação, a deposição seca e húmida de espécies gasosas e aerossóis em modo interativo com o modelo WRF mesoescala. Como o modelo integra simultaneamente processos meteorológicos e químicos na etapa temporal da integração do modelo, é capaz de representar realisticamente as complexas interações físicas e químicas que ocorrem na atmosfera.

Entretanto, o modelo CMAQ é outro modelo tridimensional Euleriano de qualidade do ar que foi desenvolvido principalmente para a previsão regional da qualidade do ar pela USEPA. O modelo calcula os processos químicos para a evolução atmosférica das espécies gasosas e aerossóis. No entanto, os campos meteorológicos são primeiro preparados independentemente pelo modelo WRF e depois alimentados para o modelo CMAQ através do pacote MCIP (*Meteorology-Chemistry Interface Processor*) para calcular os processos químicos para o sistema WRF/CMAQ. Ao contrário do sistema WRF/Chem, o sistema WRF/CMAQ é um modelo de qualidade do ar *offline*, que calcula os campos meteorológicos e químicos sequencialmente [Herwehe *et al.* \(2011\)](#).

4.2.2 Configuração dos modelos

Os sistemas de modelagem WRF/Chem e WRF/CMAQ foram exclusivamente configurados para simular MP10 (partículas com diâmetro aerodinâmico até 10 μm) e MP2.5 (partículas com diâmetro aerodinâmico até 2.5 μm) na RMV e examinar as características em termos de consistência da previsão do modelo. A este respeito, tanto as opções meteorológicas como as emissões antropogênicas e biogênicas foram atribuídas de forma idêntica, enquanto os processos químicos (química de gás e aerossol, deposição seca e húmida) foram utilizados nas suas próprias opções. Estas configurações idênticas podem

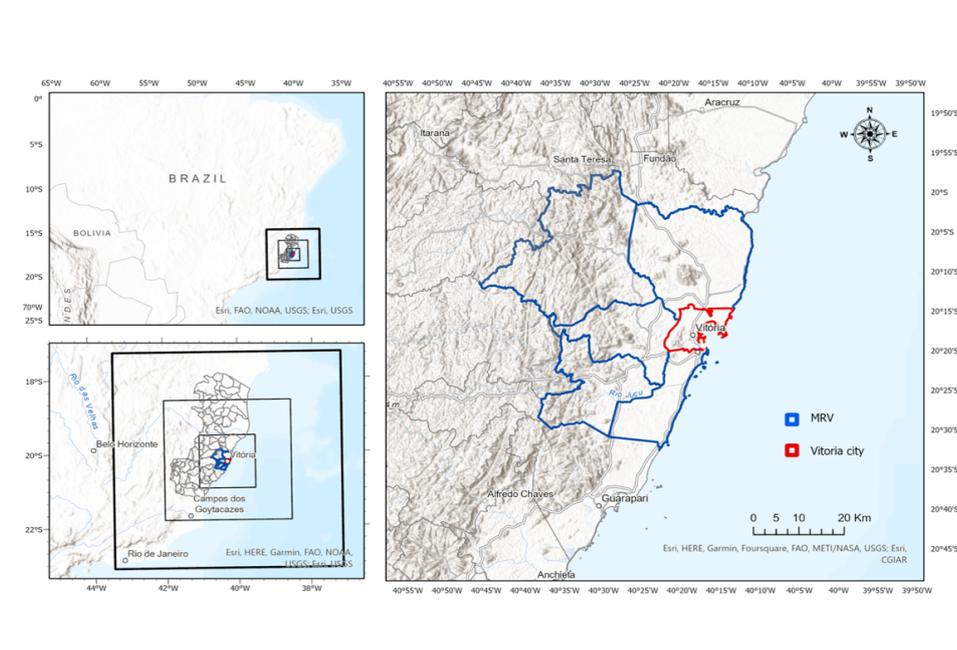
reduzir a diversidade do desempenho do modelo para efeitos meteorológicos diretos (transporte, mistura turbulenta), bem como processos de emissão.

As influências meteorológicas nas simulações dos componentes químicos das MP10 e MP2.5 podem em grande parte ser atribuídas ao modo de integração física, ou seja, *online* e *offline*. Os domínios espaciais dos modelos WRF/Chem (versão 3.9.1.1) e WRF/CMAQ (versão 3.9.1.1/versão 5.0.2) cobrem a RMV de forma idêntica. Portanto, para simular os campos meteorológicos com uma melhor compreensão da dinâmica atmosférica, física e fenômenos atmosféricos, o modelo WRF foi configurado da seguinte forma: três domínios aninhados com resoluções de grade de 9, 3, e 1 km, respectivamente (Figura 4.3).

O domínio de interesse tem uma resolução horizontal de 1 km e 43 níveis verticais, com o modelo de topo fixado em 50 hPa. O sistema WRF/Chem simulou os campos meteorológicos e os campos de concentração química nos mesmos 43 níveis verticais, enquanto o modelo CMAQ calculou os campos de concentração química a 23 níveis sigma reduzidos, para os quais o MCIP produziu os campos meteorológicos compatíveis com a grade CMAQ a partir dos campos meteorológicos previstos no WRF a 43 níveis.

A utilização de resolução vertical reduzida da grade no sistema WRF/CMAQ é frequentemente selecionada para melhor eficiência computacional [Otte & Pleim \(2010\)](#). A Figura 4.3 mostra a localização da WRF no Brasil (superior esquerda) com os domínios aninhados com resoluções de grade de 9 km (D01 - 73 x 73 células de grade), 3 km (D02 - 121 x 121 células de grade) e 1 km (D03 - 159 x 159 células de grade) (inferior esquerda), e a sua localização na grade menor (a direita).

Figura 4.3: Localização da RMV no Brasil. Domínios aninhados com resoluções de grade de 9 km (D01), 3 km (D02) e 1 km (D03) e a sua localização na grade menor (direita).



A escolha desta configuração foi baseada em trabalhos anteriores na mesma área de es-

tudo Pedruzzi *et al.* (2019), Kitagawa *et al.* (2021), Kitagawa *et al.* (2022). As simulações foram estabelecidas para funcionar para o mês de agosto de 2015, um mês de baixa pluviosidade com um dia de simulação. Os esquemas de parametrização física adotados foram RRTMG (*Rapid Radiative Transfer Model*) para radiação de ondas curtas e longas; esquema Thompson como opção microfísica; Noah-MP como modelo de superfície terrestre; Grell-Freitas como esquema de cúmulo; exceto para o esquema PBL, similaridade Eta como camada de superfície e Bougeault e Lacarrere (BouLac) para PBL.

O processador de emissões SMOKE (versão 4.7, em <https://zenodo.org/record/4088945>) foi executado utilizando dados de inventário de emissões locais fornecidos pela agência ambiental local (IEMA, 2019). Este inventário de emissões é descrito em mais pormenor na secção seguinte. Os perfis temporais foram retirados do trabalho de Pedruzzi *et al.* (2019). A especiação química foi feita para o mecanismo químico CB06 (*Carbon Bond 06*) com o módulo aerosol AERO 07 usando SPECIATE (versão 5.0, disponível em <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/>) para ambos os modelos de qualidade do ar.

No modelo CMAQ as emissões biogénicas foram geradas pelo modelo MEGAN (*Model of Nature's Gas and Aerosol Emissions*, versão 2.10) Guenther *et al.* (2012). O MCIP introduz a saída do modelo WRF para preparar os ficheiros meteorológicos exigidos pelo CMAQ, SMOKE, e modelo MEGAN. O modelo WRF/Chem utilizou MOZCART (*Model for Ozone and Associated Chemical Tracers*) Emmons *et al.* (2010) e GOCART (*Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport*) Chin *et al.* (2000) para química gasosa e aerossol.

As condições contorno para o sistema WRF/Chem utilizaram a ferramenta de pré processador MOZBC, modelo com simulações químicas (CAM-Chem) Buchholz, Emmons & Tilmes (2019) e, com o modelo CMAQ, condições limite ICON inicial e BCON. É importante notar que os dados de arranque antropogénicos para o modelo WRF/Chem foram gerados utilizando o pré-processador de emissões químicas EPA ANTHRO EMIS. Esta ferramenta permite aos utilizadores criar ficheiros de entrada de emissões antropogénicas horárias compatíveis com WRF/Chem a partir da saída netCDF do SMOKE. A Figura 4.4 e 4.5, abaixo, mostra o fluxograma básico tanto para os sistemas de modelação como o Tabela 4.4 mostra um resumo das definições utilizadas nos modelos.

Figura 4.4: Fluxograma de sistemas de modelagem: a) WRF/CMAQ. O sistema utiliza SMOKE na preparação das emissões.

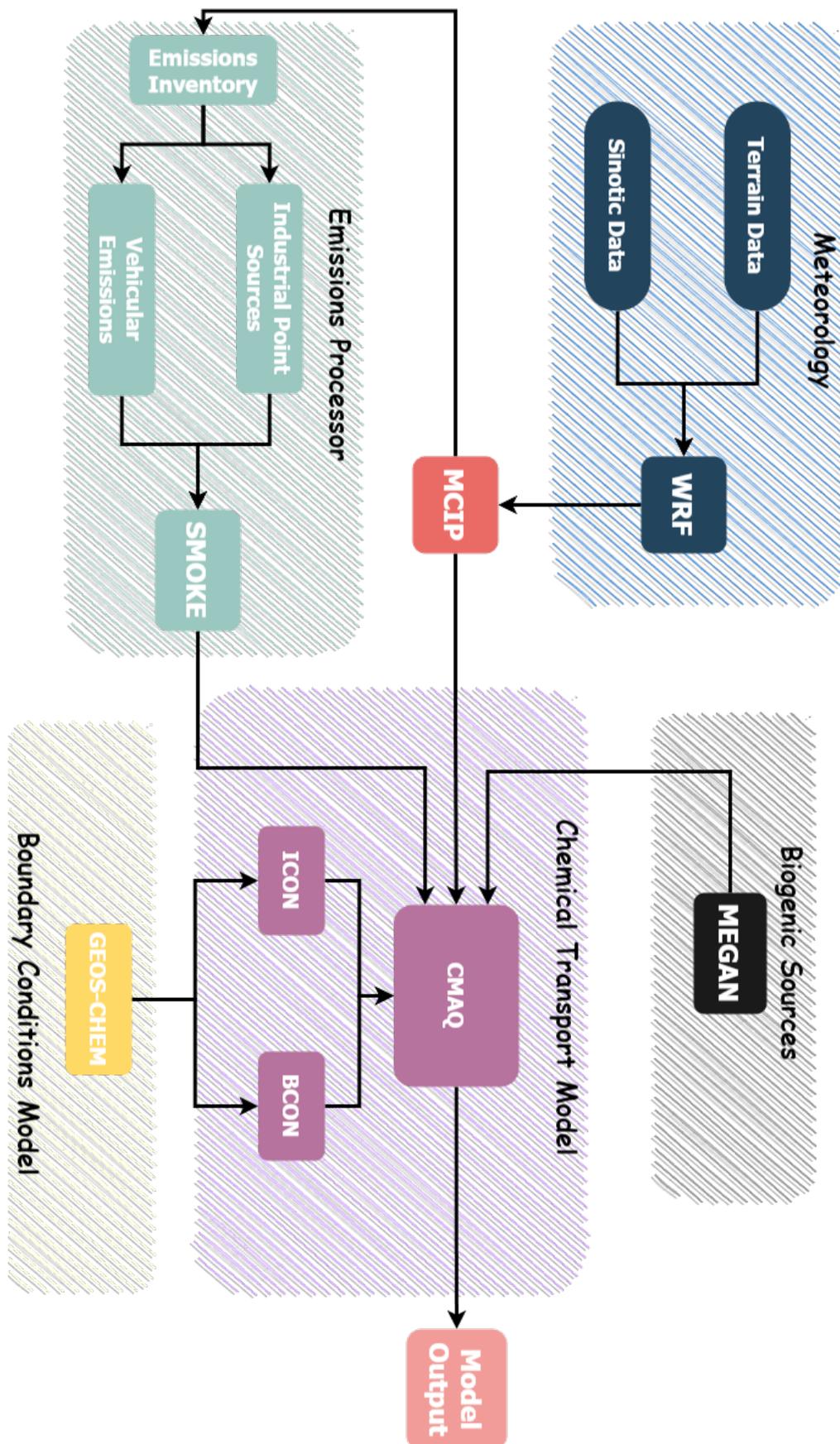


Figura 4.5: Fluxograma de sistemas de modelagem: b) WRF-Chem. O sistema utiliza SMOKE na preparação das emissões.

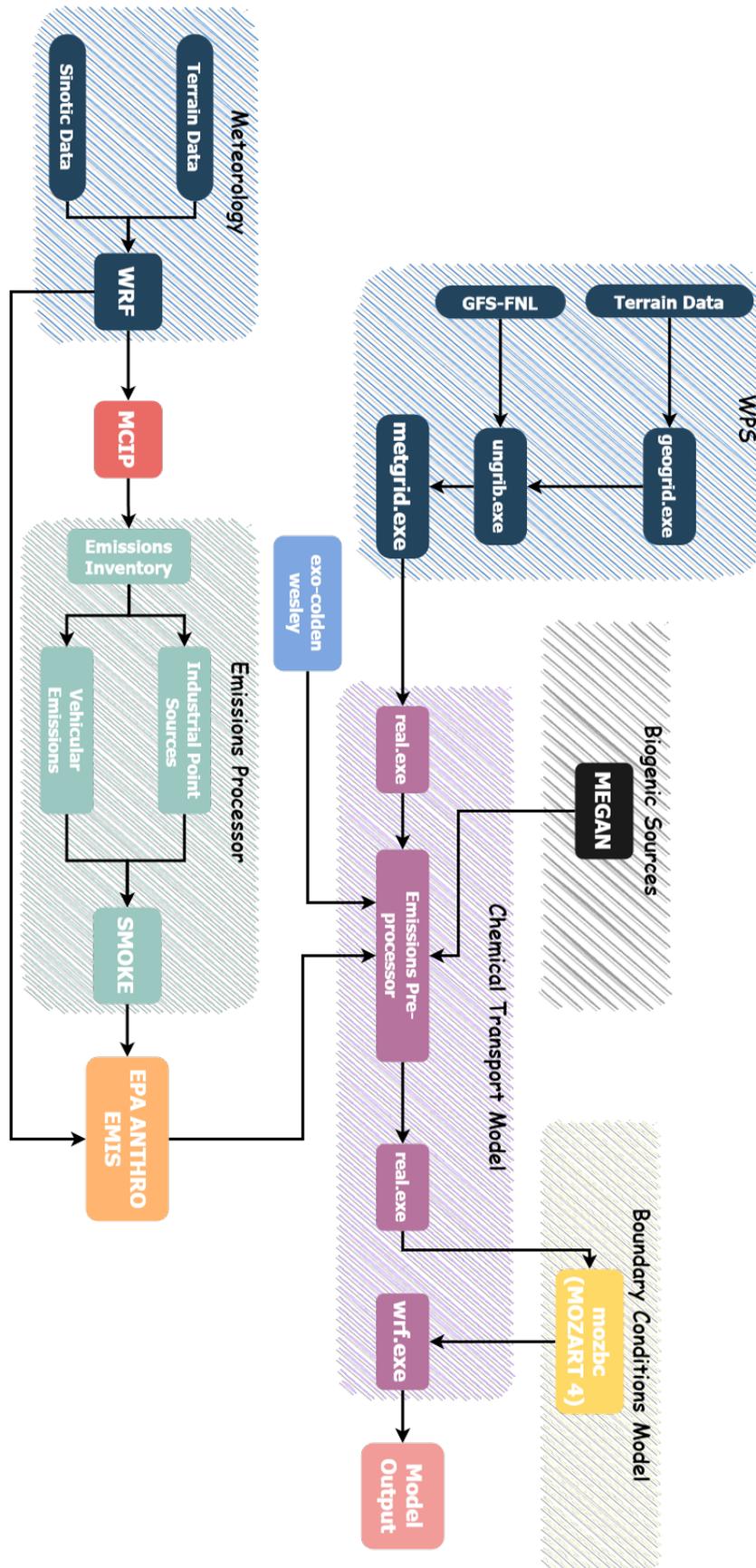


Tabela 4.1: O resumo das Configurações dos modelos

Configurações dos modelos		
	WRF-Chem	CMAQ
Versão	3.9.1.1	5.02
Meteorologia	WRFv3.9.1.1	WRFv3.9.1.1
Resolução espacial horizontal	1 km	1 km
Resolução temporal	Horaria	Horaria
Condição de contorno química	MOZBC	Model default
Emissões antropogênicas	Órgão ambiental local (ano base 2015) / SMOKE	Órgão ambiental local (ano base 2015) / SMOKE
Emissões biogênicas	Megan	Megan
Mecanismo químico (fase gás)	MOZART (Emmons et al., 2010)	CB06 (Choi et al., 2019)
Aerosol module	GOCART	AER07

As emissões processadas pelo modelo SMOKE incluíam dados fornecidos pela agência ambiental local (agosto, ano base 2015) da RMV [IEMA \(2019\)](#). O inventário oficial de emissões foi desenvolvido com base em fatores de emissão da literatura, tais como a americana (USEPA) e agências ambientais europeias (EMEP/EEA). Além disso, o método do inventário de emissões seguiu o DARS (Data Attribute Rating), que foi um método proposto pela USEPA (1996).

Através desta metodologia, o inventário de emissões foi desenvolvido de acordo com os critérios do EIIP (Emissions Inventory Improvement Program) para o Nível II relativamente à garantia de qualidade e requisitos de controle de qualidade, que incluem as seguintes etapas: verificação da realidade, revisão, cálculos de amostras, análise sensível, e auditorias independentes. Finalmente, este inventário de emissões incluiu dados de cinco dos sete municípios da RMV (Serra, Cariacica, Viana, Vila Velha, e Vitória). O Tabela 4.2 resume as emissões anuais totais de partículas MP10 e MP2.5 para mais de 3.000 fontes dentro da região do estudo.

Tabela 4.2: Emissão anual total de poluentes atmosféricos por setores

Setores	MP (kg/h)	MP10 (kg/h)	MP2.5 (kg/h)
Aterro sanitário	22.6	6.3	1.8
Construção civil	96.1	31.2	3.4
Distribuição de combustíveis	n. a	n. a	n. a
Indústria alimentar	16.3	11.2	10.3
Indústria de produtos minerais	143.8	84.7	43.8
Indústria de produtos químicos	8.3	6.2	3.8
Indústria mineira do aço	887.0	566.9	368.9
Transporte marítimo	72.4	52.9	44.2
Outros do setor industrial	59.7	46.0	39.4
Residencial e comercial setores	1.0	1.0	1.0
Emissões veiculares	55.9	43.1	32.5
Ressuspensão de poeira das estradas	6744.7	1294.6	313.2
Total	8107.8	2144.1	862.3
n.a.: não aplicável.			

O Tabela 4.2 mostra que as MP10 e MP2.5 estão entre as que apresentam as emissões anuais mais elevadas relacionadas com a indústria mineira do aço e a ressuspensão das estradas. É importante notar que existem outras fontes nesta área. No entanto, apenas as fontes industriais que apresentavam a maior quantidade anual de MP10 e MP2.5 (top 10) são mostradas. Cinco das seis principais fontes pontuais (pilhas) estão localizadas na área do complexo mineiro e siderúrgico, que representa uma central termoelétrica, central elétrica, forno de peletização, instalação de sinterização, forno básico de produção de aço a oxigênio, e baterias de fornos de coque. O setor marítimo é caracterizado pelos terminais portuários na Figura 4.3, mas há também tráfego marítimo próximo da linha de costa. Todos os produtos químicos utilizados nesta modelação foram obtidos a partir de perfis de literatura, especificamente, a base de dados EPA SPECIATE 5.0, uma vez que não existe nenhum perfil químico observado para as fontes na região.

Para analisar a performance do modelo, compara-se os dados simulados com os dados modelados.

4.3 Avaliação estatística com o DFA e $\rho DCCA$

4.3.1 Breve descrição dos métodos DFA e $\rho DCCA$

Neste estudo, foram implementadas duas metodologias distintas: (DFA) e o ($\rho DCCA$), com o objetivo de analisar a propriedade das distintas séries temporais.

O (DFA) é um método estatístico usado para estudar a correlação em séries temporais. É útil para identificar tendências ou padrões que podem ser mascarados por ruído ou volatilidade. Essa análise pode revelar propriedades de autocorrelação em um processo estocástico e é frequentemente usada para investigar a presença de comportamento fractal ou de escala em séries temporais. O (ρ_{DCCA}) é uma extensão da DFA que pode ser aplicada a duas séries temporais. Ele mede o grau de correlação entre as séries, levando em conta possíveis tendências e outros fatores que podem distorcer a relação entre as séries. A ideia é explorar as correlações de longo alcance entre as séries, sem ser afetado por não-estacionariedades.

O valor de (ρ_{DCCA}) pode variar entre -1 e 1, onde:

(ρ_{DCCA})=1 indica uma correlação positiva perfeita entre as séries;

(ρ_{DCCA})=-1 indica uma correlação negativa perfeita entre as séries;

(ρ_{DCCA})=0 indica nenhuma correlação.

A análise DFA e DCCA pode ser usada em vários campos, incluindo física, economia, e ciências naturais, para investigar a dinâmica interna e as relações entre séries temporais. A DFA foi empregada para explorar a progressão das concentrações poluentes, o que nos permite avaliar sua persistência a longo prazo. Já o ρ_{DCCA} foi usado para sondar a correlação de longa distância entre as concentrações de poluentes e quatro variáveis climáticas separadas. A metodologia DFA é executada através de várias etapas. Primeiro, baseando-se em uma série temporal de comprimento N, o perfil cumulativo é calculado, usando a média observada $\langle x \rangle$ como referência para a série original. Esse perfil é então subdividido em diferentes intervalos temporais de comprimento n. Para cada intervalo, uma tendência local é obtida via mínimos quadrados ordinários. A DFA é então adquirida pela regressão log-log, resultando numa lei de potência cujo expoente, conhecido como expoente de Hurst, fornece informações sobre a natureza da série temporal. Enquanto a DFA é aplicada a séries temporais individuais, a DCCA examina a correlação cruzada entre pares de séries temporais. A lógica dessa metodologia é análoga à DFA, considerando duas séries temporais X_t e Y_t , ambas de igual duração. A partir dos respectivos perfis cumulativos e da covariância dos resíduos, calculamos a covariância desviada, fornecendo assim a correlação cruzada entre as séries. Por fim, o coeficiente de correlação DCCA, sugerido por [Zebende \(2011\)](#), combina os resultados da DFA e DCCA. Isso nos permite analisar a correlação cruzada entre séries temporais não estacionárias. A determinação do coeficiente passa por cinco etapas, que começam pela integração das séries temporais, seguida pela subdivisão das séries em caixas sobrepostas de igual comprimento, cálculo da tendência local e da covariância dos resíduos em cada caixa. Posteriormente, a função de covariância é obtida e, finalmente, o coeficiente de correlação cruzada é determinado.

Ambas as metodologias têm sido aplicadas em diversas áreas de investigação, incluindo a climatologia e a análise da emissão de gases. Neste trabalho, empregamos essas técni-

cas para estudar a inter-relação entre as concentrações de poluentes e diversas variáveis climáticas em áreas metropolitanas selecionadas.

4.4 Índices estatísticos

Os índices estão descritos a seguir: o e p indicam as quantidades observadas e previstas, respectivamente \bar{C} é a concentração do poluente e δ é o desvio.

Erro quadrático Médio Normalizado Nmse, definido como:

$$Nmse = \sum \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{C_o - C_p} \quad (4.1)$$

Informa sobre todos os desvios entre concentrações simuladas nos modelos C_p e concentrações observadas C_o . É uma estatística adimensional, quanto mais próximo de zero, maior é a confiabilidade do modelo.

Desvio Fracional (Fb):

$$Fb = \frac{\bar{C}_o - \bar{C}_p}{0,5(\bar{C}_o - \bar{C}_p)} \quad (4.2)$$

Este coeficiente informa a tendência do modelo de superestimar ou subestimar as concentrações observadas. Quanto mais próximo de zero, maior é a confiabilidade do modelo.

Desvio Padrão Fracional (Fs):

$$Fs = 2 \frac{\sigma_o - \sigma_p}{\sigma_o + \sigma_p} \quad (4.3)$$

onde α_o e α_p representam, respectivamente, os desvios padrões das concentrações observadas e simuladas. Este índice compara variabilidades dos dados observados e modelados. Quanto mais próximo de zero, maior é a confiabilidade do modelo. Fator de 2 (*FAT2*) representa a fração de dados que estão entre $0.5 < (C_p/C_o) < 2$. O valor deve ser o mais próximo possível da unidade (1), pois é o critério para maior confiabilidade do modelo.

Coeficiente de Correlação (Cor) definido como:

$$Cor = \frac{\overline{(C_o - \bar{C}_o)(C_p - \bar{C}_p)}}{\sigma_o \sigma_p} \quad (4.4)$$

O valor de (Cor) varia de 0 a 1, onde 1 indica que o modelo explica toda a variabilidade nos dados observados, e 0 indica que o modelo não explica nada. Portanto, um valor próximo de 1 significa que as previsões estão muito próximas das observações, o que é uma indicação de um modelo altamente confiável. O índice estatístico Fb reflete se as quantidades esperadas subestimam ou superestimam os valores observados. O índice estatístico Nmse representa a dispersão da saída do modelo em relação à dispersão de dados os melhores resultados forneçam valores próximos de zero para os índices Nmse, Fb e Fs, e próximos de 1 para os índices Cor e FAT2. Os desempenhos do modelo foram comparados com dados modelados e observados de hora a hora com as variáveis meteorológicas de temperatura de superfície a 2 m (T2), velocidade do vento a 10 m (WS10), e direção do vento a 10 m (WD10). A avaliação do desempenho do modelo foi realizada considerando cinco estações meteorológicas e sete estações de qualidade do ar (ST) para MP10 e MP2.5. Vale a pena notar que existem sete estações que recolhem concentrações de MP10, mas apenas duas destas estações (ST04 e ST06) para as MP2.5.

Resultados Numéricos

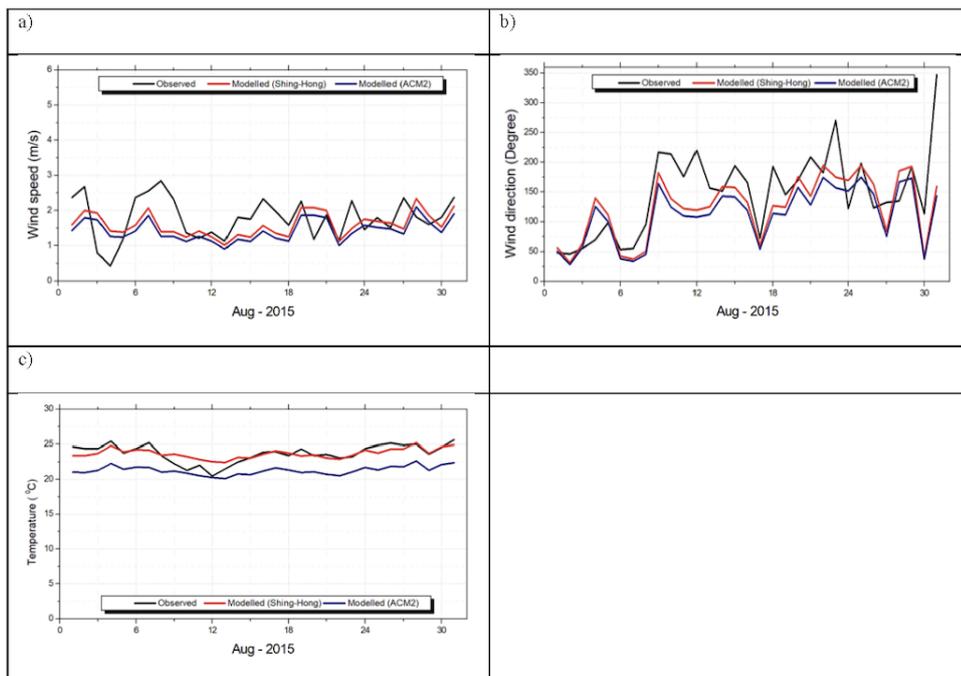
5.1 Comparação dos modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ na RMV

A princípio, utilizou-se dados referentes a dispersão de poluentes atmosféricos para identificar os efeitos da ocorrência do fenômeno da brisa marítima nas simulações. Então, posteriormente, realizou-se o tratamentos dos dados utilizando os modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ para analisar comparativamente a performance dos modelos.

5.1.1 Avaliação meteorológica com WRF

Inicialmente, a distribuição espacial das condições meteorológicas locais que afetam a mudança temporal da concentração de poluentes é diretamente relacionadas aos resultados da simulação. E, essa distribuição é apresentada na Figura 5.1 ilustrando o comportamento médio diário (por simplicidade, o tempo médio da estação durante o mês de Agosto de 2015).

Figura 5.1: Evolução temporal da média diária WS10, WD10 e T2 dos dados medidos da RAMQAr e simulados com o modelo WRF - agosto/2015



A Figura (5.1) apresenta a velocidade, direção do vento e temperatura simuladas pelo modelo WRF e dados medidos pela Rede de Monitoramento da qualidade do ar da Grande Vitória (RAMQAr) utilizando duas parametrizações. Ainda na Figura 5.1 é apresentada a média diária de WS10, WD10 e T2 (média da estação meteorológica) de 1 a 31 de agosto de 2015. O T2 diário observado variou de 20°C a 25,2°C. Os ventos variam predominantemente setores nordeste e leste, com velocidade cerca 1,5 m/s na região. A Tabela 5.1 apresenta os resultados estatísticos obtidos ao comparar os dados simulados e observados.

Tabela 5.1: Índices estatísticos comparando dados observados e modelados de variáveis meteorológicas RMV (*Os dados são a média entre as estações, exceto para a direção do vento que foi considerada a média*)

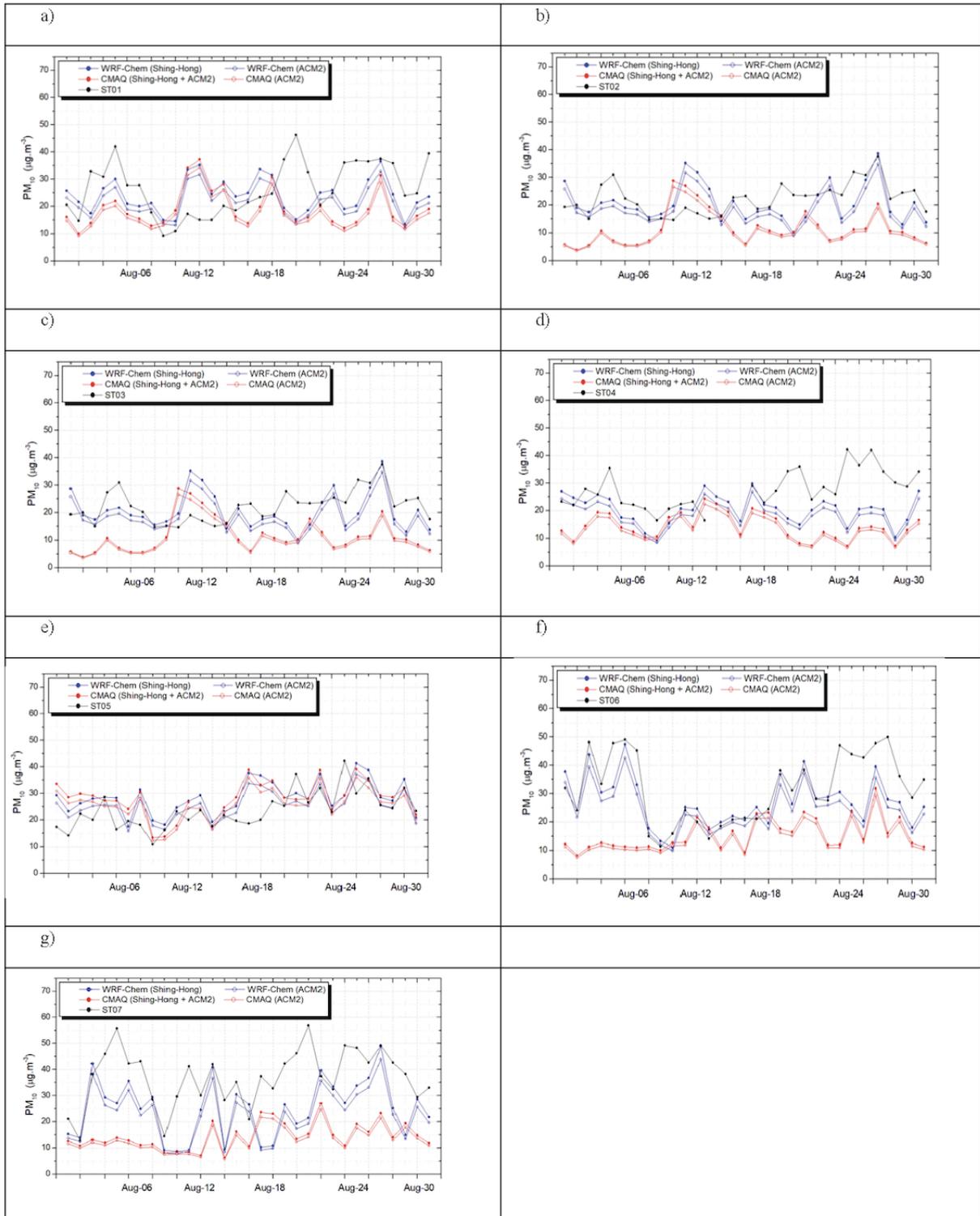
	NMSE	FB	COR	FS	FAT2
WS10	0.13	0.11	0.27	0.53	0.90
WD10	0.18	0.18	0.71	0.27	0.90
T2	0.00	0.00	0.98	0.04	1.00
RMV - média diária (Shing-Hong)					
	NMSE	FB	COR	FS	FAT2
WS10	0.18	0.21	0.44	0.47	0.87
WD10	0.24	0.28	0.68	0.39	0.87
T2	0.01	0.10	0.80	0.70	1.00
RMV - média diária (ACM2)					

Através dos dados na Tabela 5.1 pode-se perceber que o valor médio observado e o valor médio modelado ao longo do período foi muito bom para T2 e WS10, apresentando o desvio maior para WD10. Além disso, todos os índices de concordância (COR, FAT2 – valor ótimo é 1) foram maiores que 0,80 para T2 e para WS10 e WD10 foram menores que 0,72 (exceto WS10 onde FAT2 > 0,80). O índice NMSE (ideal 0) foi menor igual que 0.01 para (T2), 0.18 (WS10) e 0.24 (WD10). O modelo WRF subestimou as variáveis WS10 (FB = 0,11 (Shing-Hong) 0.21 (ACM2)) e WD10 (FB = 0,18 (Shing-Hong) 0.28 (ACM2)), mas superestimou T2 0,00 (Shing-Hong) 0.01 (ACM2)). Os resultados são geralmente aceitáveis em função da complexidade da orografia da cidade e o fato de ser uma área urbana costeira, sempre sujeita a fenômenos de brisa marítima [Salvador et al. \(2016a\)](#), [Salvador et al. \(2016b\)](#).

5.1.2 Análise de concentração MP10 e MP2.5 Média diária

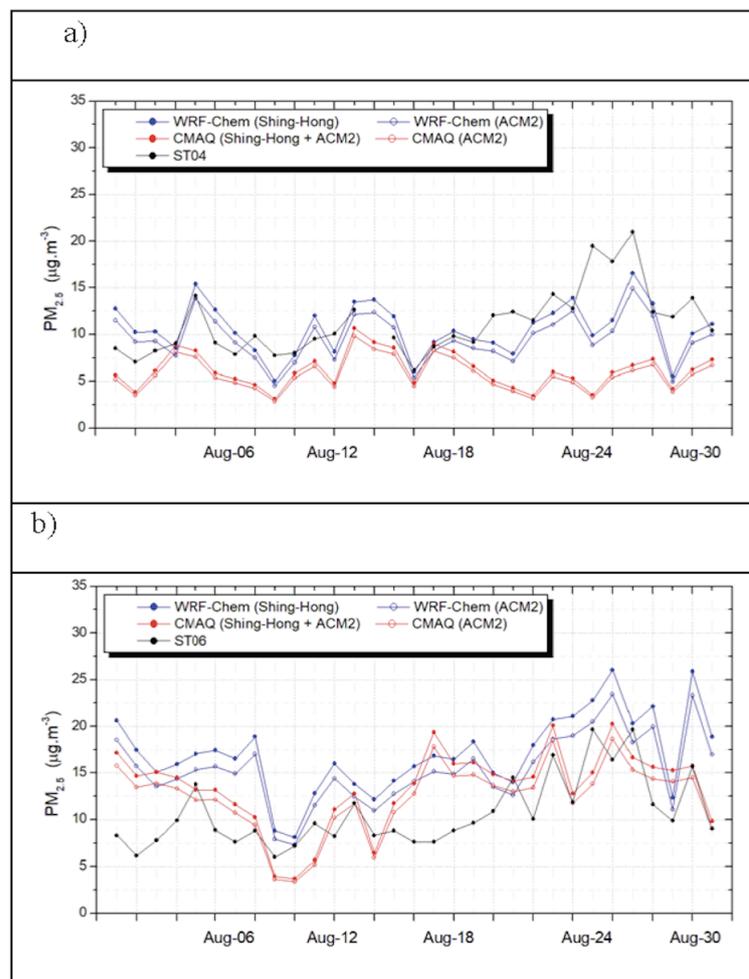
Na Figura 5.2 mostra os valores médios diários de MP10 para agosto de 2015 com base em dados simulados e observados de todas as estações.

Figura 5.2: Concentração média diária de MP10 para todas as estações (ST01 a ST07).



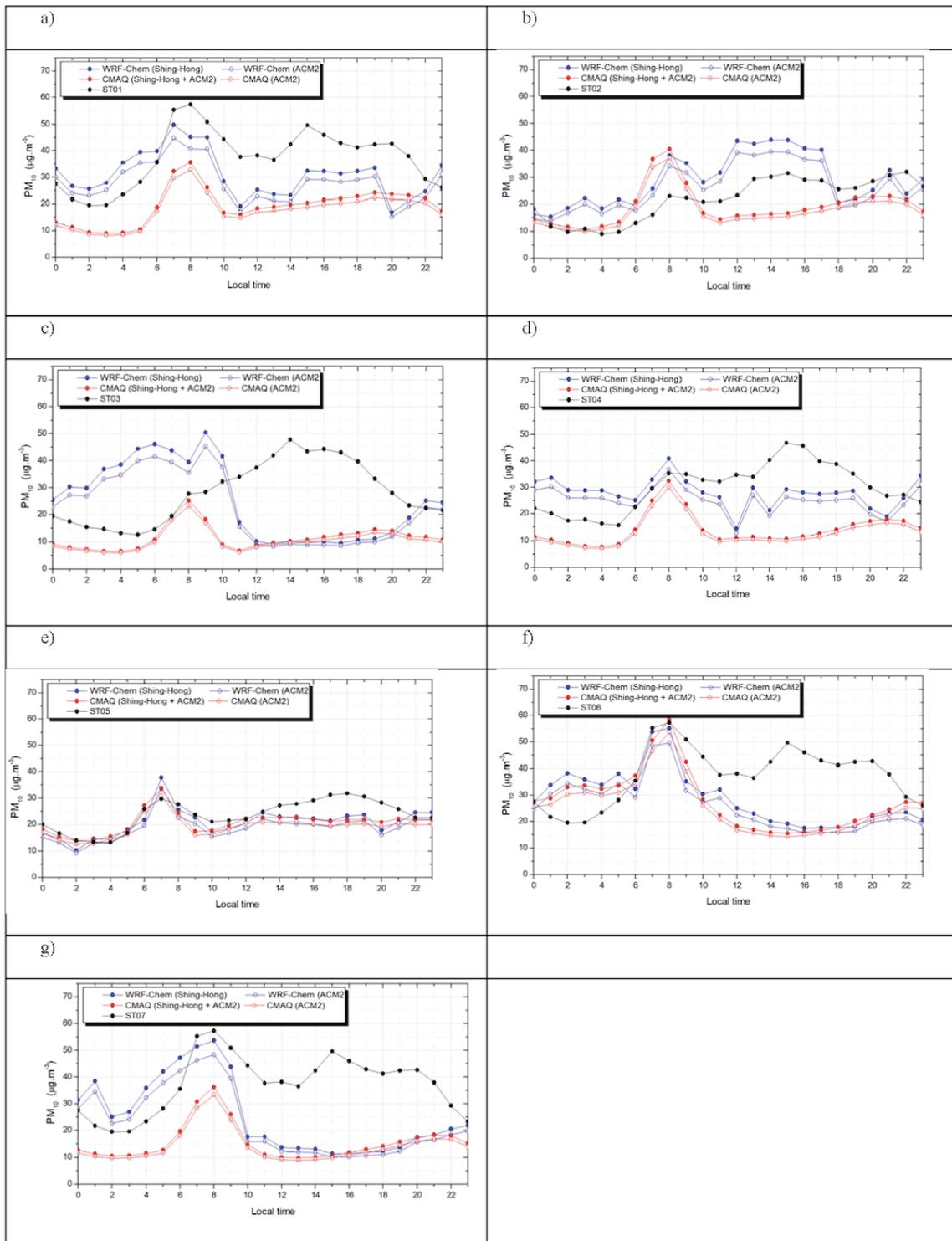
A Figura 5.2 mostra o desempenho dos modelos de qualidade do ar e a ocorrência de variação entre os dados das estações. No entanto, o modelo mais eficiente foi o WRF/Chem em praticamente todas as estações, sendo que o sistema WRF/CMAQ subestimou mais as concentrações nas estações ST06 e ST07 Figura 5.3. A Figura 5.4 mostra o desempenho dos modelos de concentração MP2.5 através das médias diárias das estações ST04 e ST06. Curiosamente, esses foram os únicos dois locais onde os dados de MP2.5 estavam disponíveis na região de estudo [Kitagawa *et al.* \(2021\)](#).

Figura 5.3: Comparação das médias diárias para MP2.5 entre os dados observados (linha preta) e WRF/Chem (linha azul) e WRF/CMAQ (linha vermelha) modelados para cada estação de qualidade do ar (ST04 e ST06).



A Figura 5.3 ilustra a ocorrência de melhor desempenho do modelo WRF/Chem através dos dados das estações ST04 e ST06, esse desempenho pode ser justificado pelo módulo *online* do WRF/Chem. A seguir avalia-se o ciclo diurno de concentração média nas Figuras 6.9 para (MP10) e 6.10 (MP2.5)

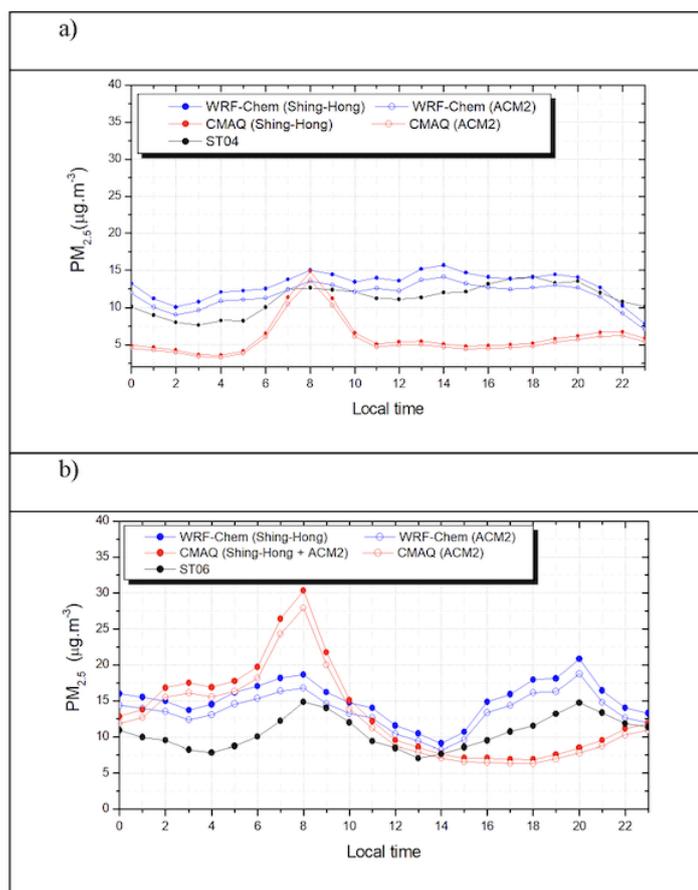
Figura 5.4: Ciclo diurno de concentração média de MP10 para todas as estações (ST01 a ST07).



A Figura 5.4 mostra que as estações ST01, ST02 e ST04 do sistema WRF/Chem exibem melhor performance na modelagem de concentrações de MP10. No entanto, nas estações ST03, ST05 a ST07 os resultados observados dos modelos são similares na maior parte do tempo (horas de observação). Isso pode indicar que o WRF/Chem é particularmente eficaz sob certas condições ou em localizações específicas. A seguir na Figura 5.5 avalia-se

o ciclo diurno de concentração média de MP2.5.

Figura 5.5: Ciclo diurno de concentração média de MP2.5 para todas as estações (ST04 e ST06).



A Figura 5.5 evidencia que, na estação ST04, o sistema WRF/Chem demonstra o melhor desempenho na modelagem das concentrações de MP2.5. Contrastando com isso, o sistema superestimou a concentração de MP2.5 na estação ST06. O sistema WRF/CMAQ, por sua vez, mostrou uma tendência de subestimação na avaliação na estação ST04, mas obteve melhores resultados na estação ST06.

A análise prossegue com a avaliação do desempenho estatístico, utilizando os índices *FAT2*, *Cor*, *Fb*, *Fs* e *Nmse*, conforme definido por Hanna & Paine (1989). Estes índices são apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.3 e são usados para estimar as concentrações dos modelos. A avaliação inclui tanto a concentração média diária de MP10 e MP2.5 quanto o ciclo diurno. Essa abordagem estatística proporciona uma maneira rigorosa de comparar a precisão e a confiabilidade dos dois sistemas de modelagem em diferentes locais e sob diferentes condições.

Tabela 5.2: Índices estatísticos comparando as concentrações de MP10 observadas e modeladas para as estações ST01 a ST07.

Média diária MP10 (Shing-Hong)										
RMV	NMSE CHEM	NMSE CMAQ	FB	FB	COR	COR	FS	FS	FAT2	FAT2
			CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ
ST01	0.01	0.14	0.10	0.31	1.00	0.76	0.10	0.00	1.00	0.76
ST02	0.01	0.64	0.10	0.63	1.00	0.45	0.10	0.14	1.00	0.51
ST03	0.03	0.31	0.10	0.43	0.99	0.78	0.12	0.42	0.97	0.74
ST04	0.02	0.18	0.10	0.32	1.00	0.41	0.10	0.41	1.00	0.93
ST05	0.01	0.02	0.10	0.09	1.00	0.87	0.10	0.03	1.00	1.00
ST06	0.01	0.53	0.10	0.54	1.00	0.17	0.10	0.43	1.00	0.61
ST07	0.01	0.58	0.10	0.53	1.00	0.54	0.10	0.71	1.00	0.54
Média diária MP10 (ACM2)										
RMV	NMSE CHEM	NMSE CMAQ	FB	FB	COR	COR	FS	FS	FAT2	FAT2
			CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ
ST01	0.10	0.22	0.22	-0.10	0.86	0.70	-0.08	-0.43	0.96	0.93
ST02	0.12	0.53	-0.07	0.55	0.29	0.45	0.17	0.06	0.96	0.58
ST03	0.23	0.26	0.36	-0.32	0.78	0.55	0.34	-0.26	0.75	0.75
ST04	0.09	0.12	-0.11	0.24	0.46	0.41	-0.26	0.33	1.00	0.93
ST05	0.01	0.09	0.01	0.18	0.87	0.51	-0.05	-0.13	1.00	0.96
ST06	0.10	0.64	-0.15	0.61	0.75	0.17	-0.31	0.51	0.96	0.58
ST07	0.30	0.71	-0.03	0.60	0.42	0.39	0.01	0.78	0.71	0.48

Na Tabela 5.2, o índice NMSE (ideal é igual a 0) foi menor igual que 0.03 para WRF/Chem em todas as estações considerando a parametrização (Shing-Hong) porém foi menor igual que 0.30 para WRF/Chem em todas as estações considerando a parametrização (ACM2) e melhor na ST05 com NMSE 0.01. O NMSE foi menor igual que 0.64 para WRF/CMAQ em todas as estações considerando a parametrização (Shing-Hong) e obteve melhor resultado na ST05 com NMSE igual 0.02, porém foi menor igual que 0.71 para WRF/CMAQ em todas as estações considerando a parametrização (ACM2) e melhor na ST05 com NMSE 0.09. Ao avaliar os resultados com índice FB, usando a parametrização proposta por (Shing-Hong) no WRF/Chem obtivemos valores aproximados igual 0.01 em todas as estações. Mas, ao utilizar a parametrização (ACM2) os resultados do FB variam de -0,15 (ST06) a 0.36 (ST03).

Ao avaliar com o CMAQ o modelo apresentou um melhor resultado na ST05 para ambas as parametrizações. Além disso, o FAT2 para ambos os sistemas foi $> 0,70$ para as estações ST01, ST03, ST04 e ST05, exceto para o CMAQ na estação ST02, ST06 e ST07 onde o FAT2 variou 0.48 a 0.61. Ressalta-se que para todas as estações o FAT2 foi melhor para WRF/Chem, com todas $> 0,71$.

No geral, destaca-se que os melhores resultados foram para o modelo WRF/Chem, com resultados particulares para a estação ST04, com $COR = 1.00$, $NMSE = 0,01$ e $FAT2 = 1.00$. Os resultados são geralmente aceitáveis dada a complexidade da orografia da cidade e o facto de ser uma área urbana costeira, sempre sujeita a fenômenos de brisa marítima [Salvador et al. \(2016a\)](#), [Salvador et al. \(2016b\)](#).

Tabela 5.3: Índices estatísticos comparando as concentrações de MP2.5 observadas e modeladas para as estações ST04 e ST06.

Média diária MP2.5 (Shing-Hong)										
RMV	NMSE CHEM	NMSE CMAQ	FB CHEM	FB CMAQ	<i>COR</i> <i>CHEM</i>	<i>COR</i> <i>CMAQ</i>	FS CHEM	FS CMAQ	FAT2 CHEM	FAT2 CMAQ
ST04	0.09	0.62	0.06	0.58	0.62	0.25	0.21	0.61	0.96	0.54
ST06	0.29	0.16	-0.46	-0.22	0.60	0.47	-0.12	-0.11	0.77	0.90
Média diária MP2.5 (ACM2)										
RMV	NMSE CHEM	NMSE CMAQ	FB CHEM	FB CMAQ	<i>COR</i> <i>CHEM</i>	<i>COR</i> <i>CMAQ</i>	FS CHEM	FS CMAQ	FAT2 CHEM	FAT2 CMAQ
ST04	0.13	0.74	0.17	0.64	0.62	0.07	0.30	0.81	0.90	0.54
ST06	0.20	0.13	-0.36	-0.14	0.60	0.47	-0.02	-0.03	0.93	0.90

Na Tabela 5.3, o índice NMSE (ideal é igual a 0) foi igual 0.09 (ST04) e 0.29 (ST06) usando WRF/Chem considerando a parametrização (Shing-Hong) porém foi menor igual que 0.20 para WRF/Chem em todas as estações considerando a parametrização (ACM2) e melhor na ST04 com NMSE 0.13.

O NMSE foi igual 0.62 (ST04) e 0.16 (ST06) WRF/CMAQ considerando a parametrização (Shing-Hong) e obteve melhor resultado na ST06 com NMSE igual 0.16, porém foi igual 0.74 (ST04) e 0.13 (ST06) WRF/CMAQ em todas as estações considerando a parametrização (ACM2) e melhor na ST06. Ao avaliar os resultados com índice FB, usando a parametrização proposta por (Shing-Hong) no WRF/Chem obtivemos valores aproximados 0.06 (ST04) e - 0.46 (ST06). Mas, ao utilizar a parametrização (ACM2) os resultados do FB valores aproximados 0.17 (ST04) e - 0.36 (ST06).

A avaliação realizada com o CMAQ o modelo apresentou um melhor resultado na ST04 para ambas as parametrizações. Além disso, o FAT2 para ambos os sistemas foi $> 0,77$ para todas as estações, exceto para o CMAQ na estação ST04 onde o FAT2 variou 0.54. Ressalta-se que para todas as estações o FAT2 foi melhor para WRF/Chem, com todas $> 0,77$. No geral, destaca-se que os melhores resultados foram para o modelo WRF/Chem, com resultados particulares para a estação ST04, com $COR = 0.62$, $NMSE = 0,09$ e $FAT2 = 0.96$. A seguir, as Tabelas 5.4 e 5.5 mostram os índices estatísticos para as concentrações de MP10 e MP2.5 com médias cronogramas no ciclo de 24 horas.

Tabela 5.4: Índices estatísticos para concentrações de MP10 com médias horárias no ciclo de 24 h para todas as estações.

Média das 24horas MP10 (Shing-Hong)										
RMV	NMSE CHEM	NMSE CMAQ	FB	FB CMAQ	COR	COR	FS	FS	FAT2	FAT2
			CHEM		CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ
ST01	0.19	0.64	0.28	0.71	0.36	0.87	0.35	0.54	0.87	0.33
ST02	0.16	0.21	0.67	0.13	0.87	0.26	-0.27	0.06	0.83	0.95
ST03	0.81	1.31	0.10	0.84	-0.47	0.33	-0.18	0.86	0.44	0.36
ST04	0.15	0.83	0.06	0.71	0.34	0.43	0.33	0.50	0.96	0.48
ST05	0.05	0.05	0.12	0.13	0.82	0.85	0.09	0.20	1.00	0.96
ST06	0.26	0.29	0.25	0.29	0.33	0.36	0.10	0.06	0.76	0.64
ST07	0.48	0.99	0.37	0.82	0.21	0.67	-0.10	0.56	0.52	0.36
Média das 24horas MP10 (ACM2)										
RMV	NMSE CHEM	NMSE CMAQ	FB	FB	COR	COR	FS	FS	FAT2	FAT2
			CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ
ST01	0.14	0.50	0.18	0.64	0.36	0.87	0.25	0.46	0.95	0.54
ST02	0.11	0.24	-0.17	0.21	0.67	0.26	-0.11	0.21	0.95	0.84
ST03	0.84	1.50	0.21	0.89	-0.47	0.26	-0.07	0.98	0.36	0.20
ST04	0.18	0.98	0.17	0.77	0.34	0.37	0.43	0.63	0.88	0.36
ST05	0.09	0.08	0.23	0.20	0.82	0.84	0.18	0.39	0.96	0.96
ST06	0.33	0.35	0.36	0.37	0.34	0.33	0.20	0.17	0.68	0.60
ST07	0.57	1.17	0.47	0.88	0.22	0.64	0.00	0.68	0.48	0.24

Na Tabela 5.4, o índice NMSE (ideal é igual a 0) porém todas estações variam positivamente para WRF/Chem em todas as estações considerando a parametrização (Shing-Hong) com melhor resultado na ST05, porém foi menor igual que 0.84 para WRF/Chem em todas as estações considerando a parametrização (ACM2) e melhor na ST05 com NMSE 0.09.

O NMSE foi menor ou igual que 1.31 para WRF/CMAQ em todas as estações considerando a parametrização (Shing-Hong) e obteve melhor resultado na ST05 com NMSE igual 0.05, porém foi menor igual que 1.50 para WRF/CMAQ em todas as estações considerando a parametrização (ACM2) e melhor na ST05 com NMSE 0.08. Ao avaliar os resultados com índice FB, usando a parametrização proposta por (Shing-Hong) no WRF/Chem os resultados do FB variam de 0.01 (ST03) a 0.67 (ST02) em todas as estações. Mas, ao utilizar a parametrização (ACM2) os resultados do FB variam de - - 0,17 (ST02) a 0.47 (ST07).

Ao avaliar o CMAQ o modelo apresentou uma melhor resultado na ST02 para ambas as parametrizações. Além disso, o FAT2 para ambos os sistemas foi $> 0,83$ para as estações ST02 e ST05, nas estações e ST01, ST04 e ST06 o FAT2 foi melhor para WRF/Chem com valores maiores 0.68 para ambas as parametrizações. Os piores resultados obtidos utilizando ambas as parametrizações, considerando FAT2, foram as estações ST03 e ST07. No geral, pode-se destacar que os melhores resultados foram obtidos pelo modelo WRF/Chem. No entanto, ambos os modelos obtiveram bons resultados na ST05.

Tabela 5.5: Índices estatísticos para concentrações de MP2.5 com médias horárias no ciclo de 24 h para as estações ST04 e ST06. Média das 24horas MP2.5 (Shing-Hong)

Média das 24horas MP2.5 (Shing-Hong)										
RMV	NMSE	NMSE	FB	FB	COR	COR	FS	FS	FAT2	FAT2
	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ
ST04	0.04	0.48	-0.15	0.58	0.86	0.55	-0.08	0.00	1.00	0.44
ST06	0.15	0.32	-0.34	-0.23	0.88	0.46	-0.27	-0.67	1.00	0.80
Média das 24horas MP2.5 (ACM2)										
RMV	NMSE	NMSE	FB	FB	COR	COR	FS	FS	FAT2	FAT2
	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ	CHEM	CMAQ
ST04	0.02	0.59	-0.04	0.63	0.87	0.34	0.00	0.17	0.96	0.32
ST06	0.08	0.27	-0.24	-0.17	0.88	0.38	-0.18	-0.77	0.96	0.96

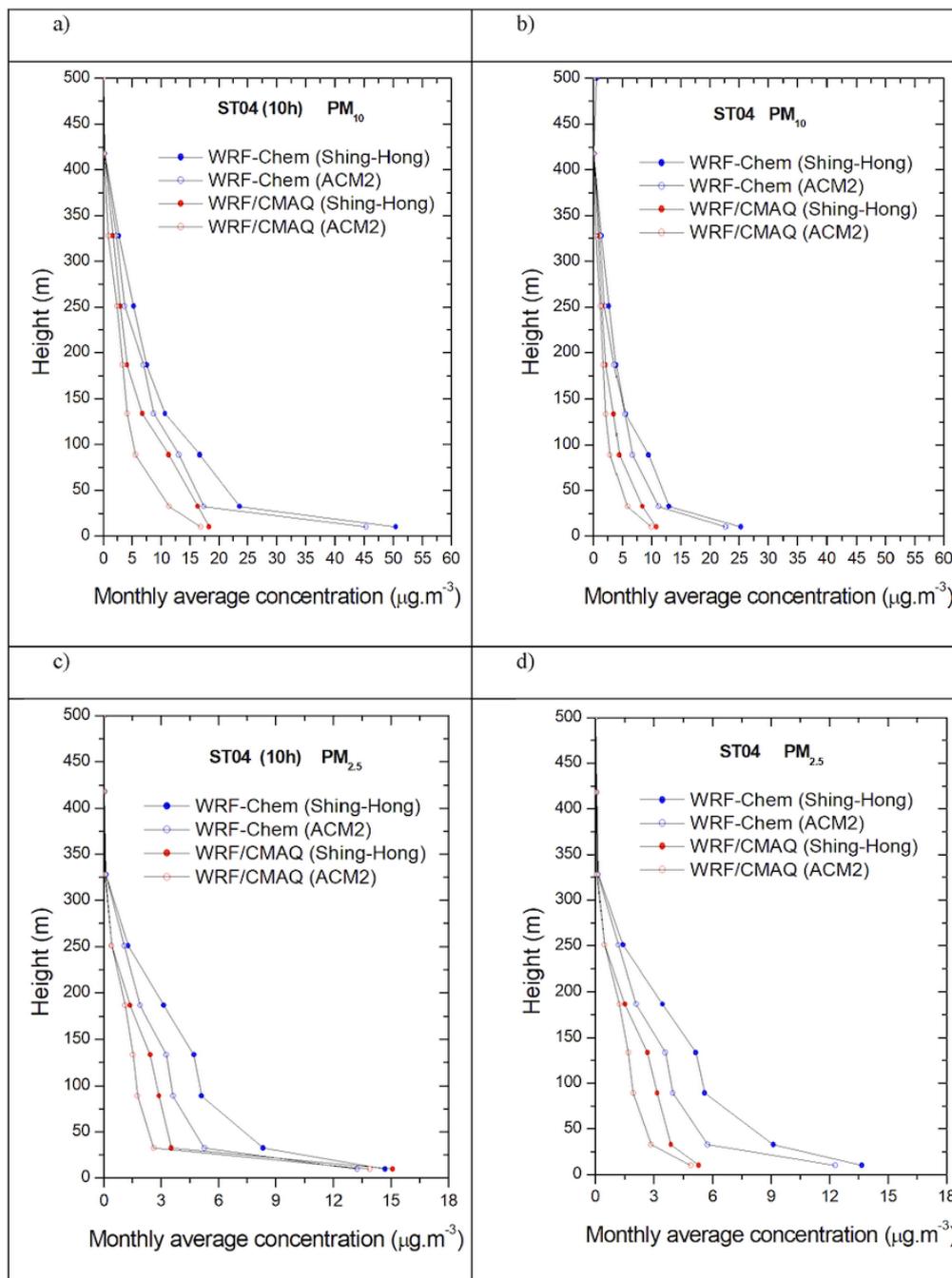
Na Tabela 5.5, o índice NMSE (ideal é igual a zero) foi igual 0.04 (ST04) e 0.15 (ST06) usando WRF/Chem considerando a parametrização (Shing-Hong) porém foi menor igual que 0.08 para WRF/Chem em todas as estações considerando a parametrização (ACM2) e melhor na ST04 com NMSE 0.04.

O NMSE foi igual 0.48 (ST04) e 0.32 (ST06) WRF/CMAQ considerando a parametrização (Shing-Hong) e obteve melhor resultado na ST06 com NMSE igual 0.32, porém foi igual 0.59 (ST04) e 0.27 (ST06) WRF/CMAQ em todas as estações considerando a parametrização (ACM2) e melhor na ST06. Ao avaliar os resultados com índice FB, usando a parametrização proposta por (Shing-Hong) no WRF/Chem obtivemos valores aproximados - 0.15 (ST04) e - 0.34 (ST06). Mas, ao utilizar a parametrização (ACM2) os resultados do FB valores aproximados - 0.04 (ST04) e - 0.24 (ST06).

Ao avaliar o CMAQ o modelo apresentou um melhor resultado na ST06 para a parametrização posposta por (Shing-Hong). Além disso, o FAT2 para ambos os sistemas foi $> 0,80$ para todas as estações, exceto para o CMAQ na estação ST04 onde o FAT2 variou 0.32 (ACM2) e 0.44 (Shing-Hong). Ressalta-se que para todas as estações o FAT2 foi melhor para WRF/Chem, com todas > 0.96 para ambas as propostas.

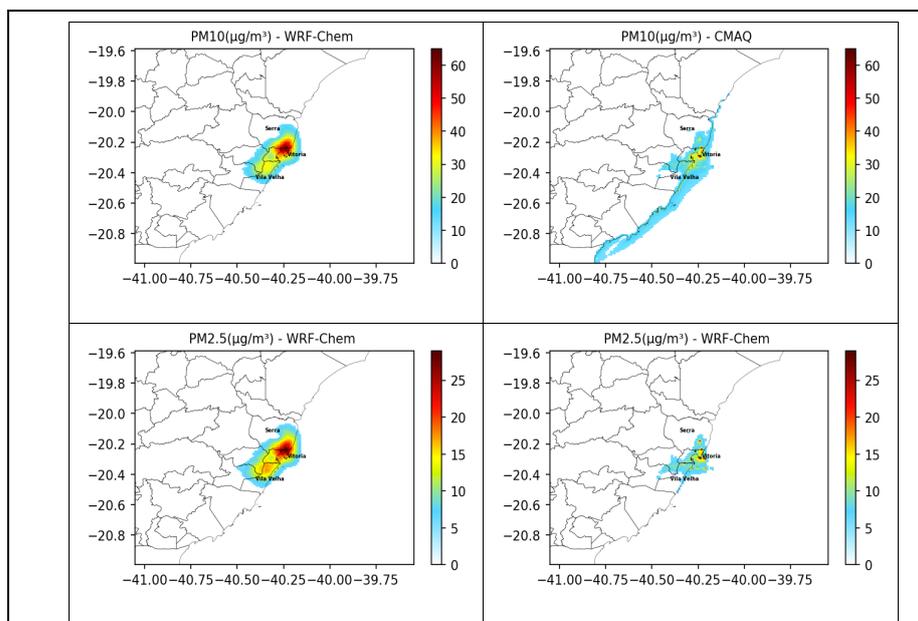
De forma geral, destaca-se que os melhores resultados foram para o modelo WRF/Chem, com resultados particulares para a estação ST06. Na Figura 5.6, realizasse a comparação das concentrações médias diárias no mês de Agosto de 2015 para MP10 e MP2.5 entre os modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ e a sua influência dos coeficientes na CLP até 500m.

Figura 5.6: Comparação das concentrações médias diárias no mês de Agosto de 2015 para MP10 e MP2.5 entre os modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ e a sua influência pela altura.

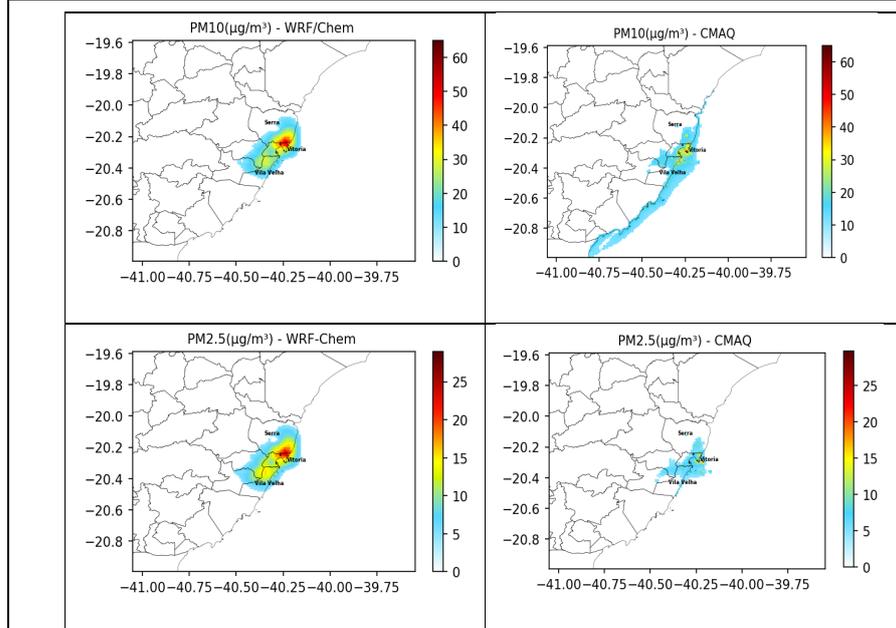


A Figura 5.6 mostra parametrizações similares em alturas próximas ao solo, em maiores alturas ocorrem variações, porém discretas. A seguir, a Figura 5.7 ilustra o campo de concentração horizontal com valores médios diários de MP10 e MP2.5 na RMV para todo o mês de agosto de 2015.

Figura 5.7: Comparação das médias das concentrações de 24h durante o mês de agosto para MP10 entre os modelos WRF/Chem (esquerda) e CMAQ (direita) na MRV, utilizando a parametrização Shing-Hong



a) Comparação das médias das concentrações de 24h durante o mês de agosto para PM₁₀ entre os modelos WRF-Chem (esquerda) e CMAQ (direita) na MRV, utilizando a parametrização Shing-Hong



b) Comparação das médias das concentrações de 24h durante o mês de agosto para PM₁₀ entre os modelos WRF-Chem (esquerda) e CMAQ (direita) na MRV, utilizando a parametrização ACM2.

A Figura 5.7 apresenta o sistema WRF/Chem possuindo uma pluma mais concentrada e os valores de concentração de MP10 e MP2.5 mais elevados obtidos na RMV. Em contrapartida, o sistema WRF/CMAQ apresenta uma pluma mais dispersa com menores concentrações de MP10 e MP2.5 na RMV, característica semelhante encontrada por Matsui *et al.* (2009), Choi *et al.* (2019). No entanto, ambos têm a mesma ordem de grandeza para as concentrações de poluentes. A influência efetiva dos diferentes padrões de transporte e difusão. Neste sentido, Avalia-se o impacto do efeito de brisa na poluição atmosférica

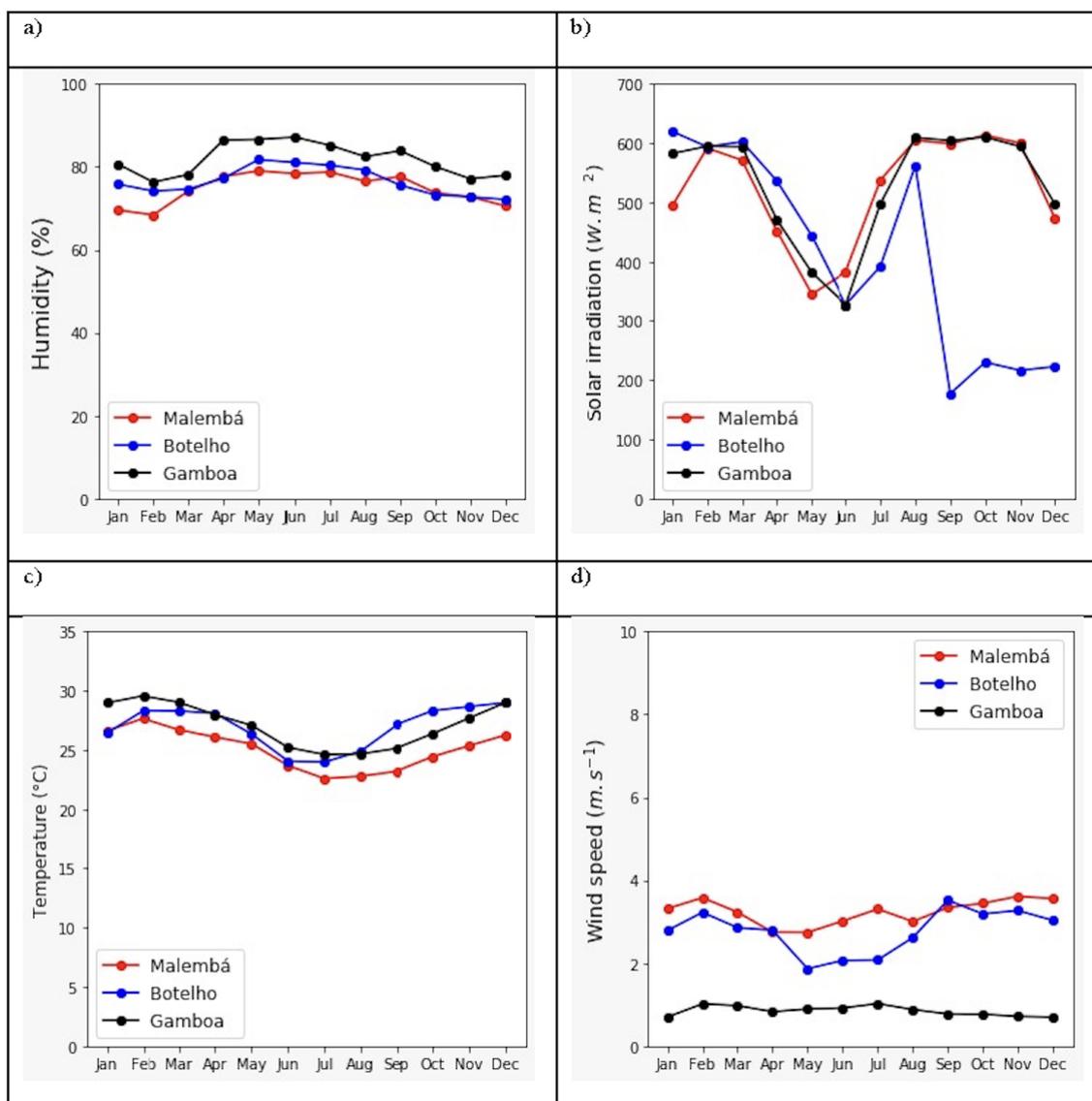
5.2 Avaliação dos dados na RMS com os métodos DFA e ρ_{DCCA}

O monitoramento da qualidade do ar e das variáveis meteorológicas estudadas visa cumprir o estabelecido no Termo de Cooperação Técnica (TCT) assinado entre o Ministério Público Estadual (MPE), o Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos da Bahia (INEMA), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), o Comitê de Desenvolvimento Industrial de Camaçari (COFIC), a Companhia Docas do Estado da Bahia (CODEBA) e a Companhia de Proteção Ambiental (CETREL). O TCT é constituído por organizações públicas e privadas. O objetivo da implementação foi o de cumprir uma obrigação legal imposta pelo MPE, reparando danos ambientais causados pelas fábricas à comunidade local, de acordo com Palmeira *et al.* (2022).

Contudo, embora a rede de vigilância seja de grande importância para a saúde da comunidade local, o seu funcionamento foi suspenso em fevereiro de 2020, devido à extinção da obrigação legal que criou o TCT e aos custos de exploração das estações. A qualidade do ar do complexo portuário é continuamente monitorada pelas estações de monitoramento localizadas em Botelho, Gamboa e Malembá Palmeira *et al.* (2022), como mostra a Figura 4.1.

Os poluentes avaliados neste estudo são NO_x (óxido de nitrogênio), O₃ (Ozônio) e MP10 (Partículas menores do que 10 μm) e as observações de variáveis meteorológicas e concentrações de poluentes são reportadas como valores médios horários somente para o ano 2019. Neste sentido, é muito importante uma análise preliminar do comportamento das variáveis meteorológicas (umidade, irradiação solar, temperatura e velocidade do vento) durante o período em análise. A Figura 5.8 mostra o comportamento da média mensal de cada variável meteorológica.

Figura 5.8: Variáveis meteorológicas: a) umidade, b) radiação solar, c) temperatura e d) velocidade do vento



A Figura 5.8 mostra como as variáveis meteorológicas retratam as características da localização de cada estação. A estação Gamboa, por exemplo, tem maior umidade e menor velocidade do vento do que as outras duas para todos os meses do ano. Ao avaliar a irradiação solar, a estação Botelho tem valores mais elevados durante o Verão (Jan-Mai) e, para os outros meses, o seu perfil de irradiação solar é mais baixo. Pode-se observar uma redução repentina na irradiação solar na estação de Botelho (Figura 5.8b) nos meses de Set-Out-Nov-Dez, que possivelmente ocorreu devido à presença de nuvens mais constantes na região (estação localizada numa ilha). Malembá e Botelho apresentam comportamentos semelhantes em relação à velocidade do vento. Contudo, Malembá apresenta ventos médios mais constantes. Relativamente à direção do vento, as Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 mostram aumento na intensidade do vento para o período de estudo.

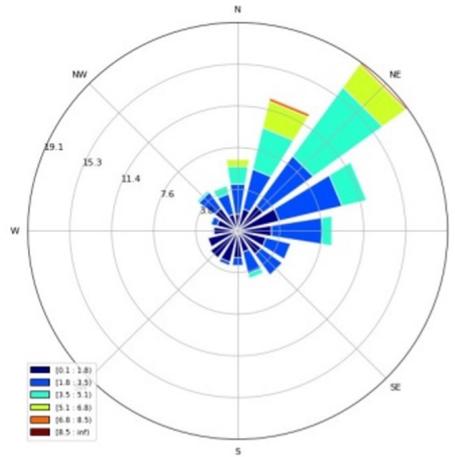


Figura 5.9: Rosa do vento para a estação Botelho. Fonte: Botelho

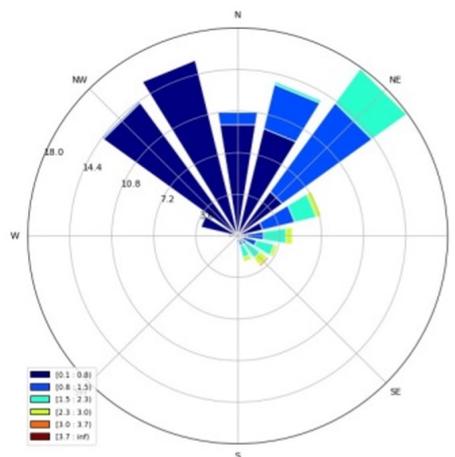


Figura 5.10: Rosa do vento para a estação Gamboa. Fonte: Gamboa

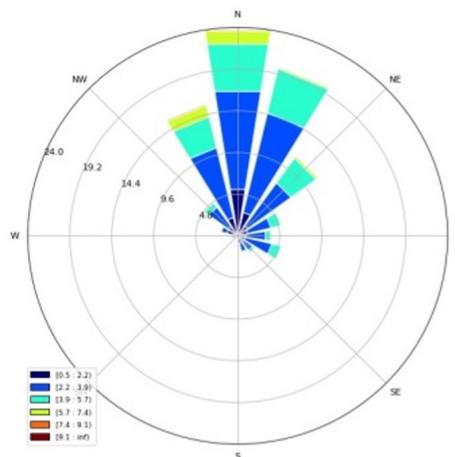
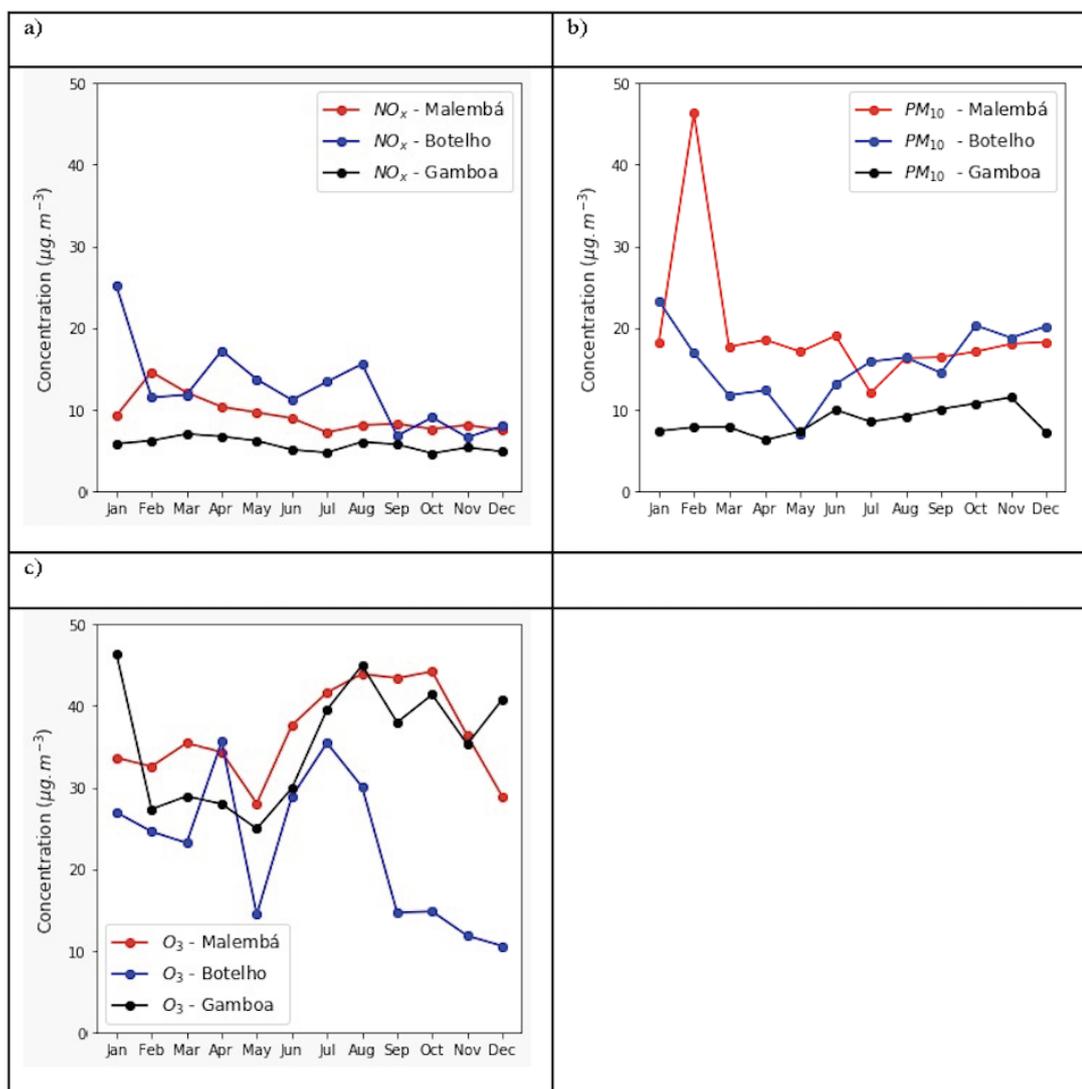


Figura 5.11: Rosa do vento para a estação Malembá. Fonte: Autoria própria, 2022.

Através das Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 ilustra-se a ocorrência de vento preferencial de maior intensidade (3,5 a 6 ms⁻¹) vindo de NE para a estação de Botelho. Para a estação de

Malembá, observa-se ventos de maior intensidade (3,9 a 7 ms⁻¹) vindos da direção N. Para a estação Gamboa, o vento também é observado vindo da direção NE/E (1,5 a 3 ms⁻¹). Contudo, nesta estação, na maioria das vezes o vento NW tem baixa intensidade (0,1 a 0,8 ms⁻¹). Isto deve-se, em parte, à presença de muitas árvores (floresta) nos seus arredores.

Figura 5.12: Média mensal para a concentração de poluentes: a) NO_x, b) MP10 e c) O₃.



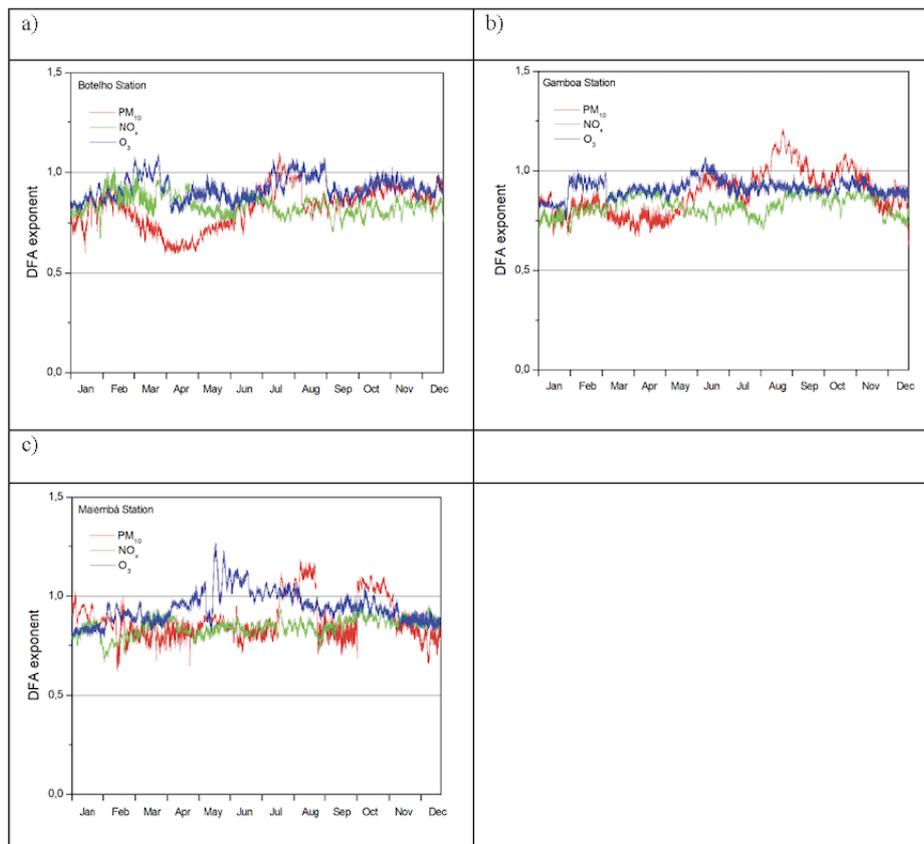
Ao analisar a Figura 5.12, observa-se que os níveis mais elevados de NO_x foram recolhidos pela estação Botelho, que está mais próxima do porto de Aratu e das indústrias petroquímicas. A estação de Malembá teve a segunda maior concentração e está também localizada perto das indústrias petroquímicas. Além disso, ambas as estações tinham velocidades de vento mais elevadas (Figura 5.8d), um fator que pode contribuir para a recolha de concentrações mais elevadas de NO_x de outras regiões. As estações de Malembá e Gamboa apresentam as concentrações mais elevadas de O₃, mas devido à sua localização, estas concentrações provavelmente tiveram origem em fontes emissoras distantes,

impulsionadas pelo vento preferencial.

É importante salientar que a estação Botelho teve uma queda na média de O₃ nos meses que coincidiram com a queda na irradiação solar. As estações Botelho e Malembá indicaram as concentrações mais elevadas de MP10 (pico em Malembá, em fevereiro), onde os valores são justificados pelas características das posições geográficas destas estações. Botelho está localizada perto de uma zona portuária com movimento de veículos pesados, para além das indústrias. Neste sentido, Malembá está localizada perto das indústrias petroquímicas e tem uma região com um maior fluxo de veículos. Tendo em conta os dados horários da irradiação solar global, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento (variáveis meteorológicas) e O₃, NO_x e MP10 (poluentes), começamos agora a estudar a influência entre as concentrações e quatro variáveis climáticas diferentes. Começamos as nossas análises calculando os expoentes do DFA para a concentração do poluentes nas três estações Shen, Li & Si (2015), Shen (2017).

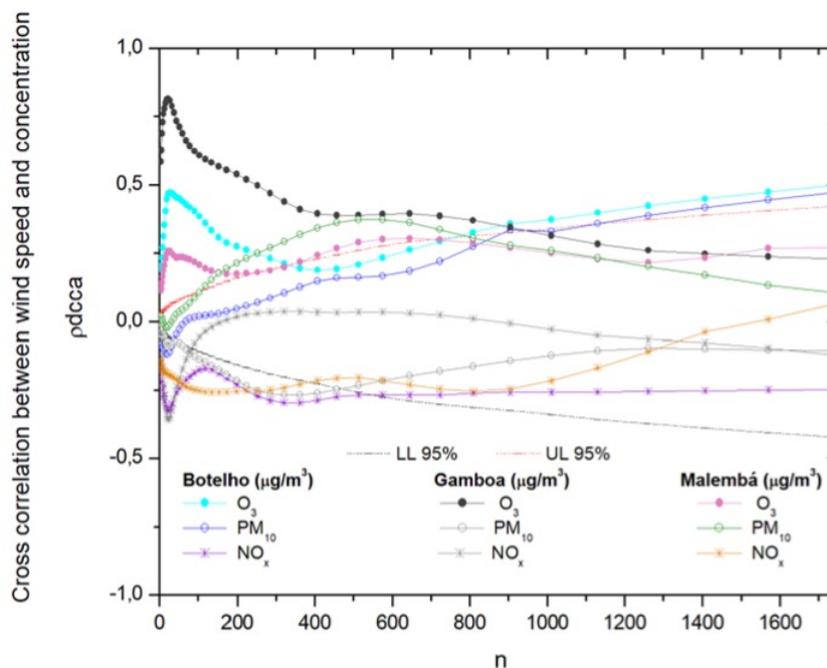
Como o nosso objetivo era analisar a evolução ao longo do tempo, foi utilizada uma abordagem de janelas deslizantes, com os resultados descritos na Figura 5.13 para estações de Botelho, Gamboa e Malembá.

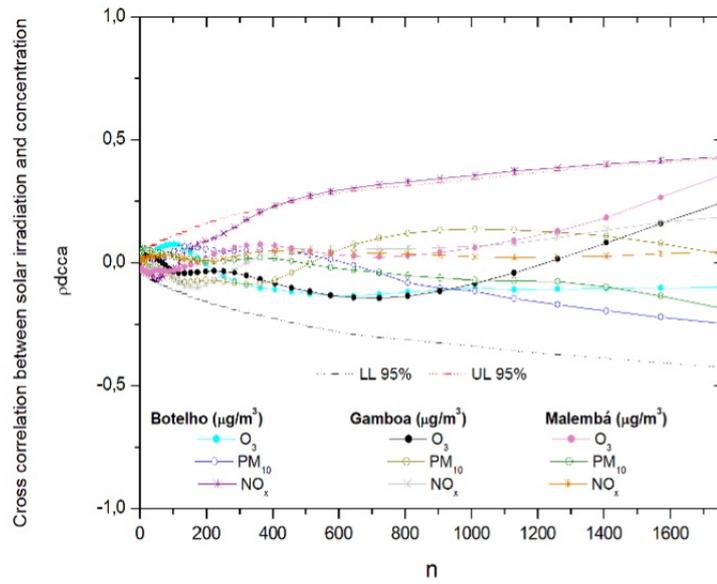
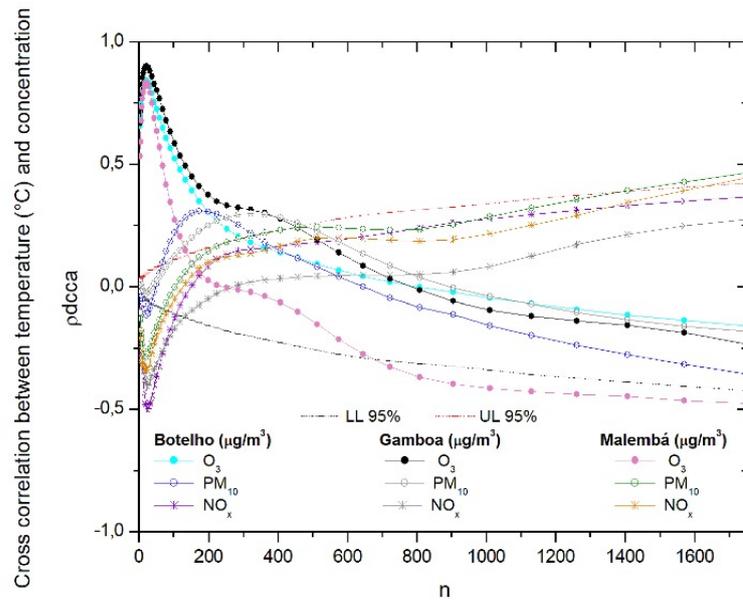
Figura 5.13: Evolução dos expoentes do DFA, considerando uma janela deslizante de 500 observações, para as concentrações de poluentes (MP10, NO_x, O₃): a) Botelho; b) Gamboa; c) Malembá.

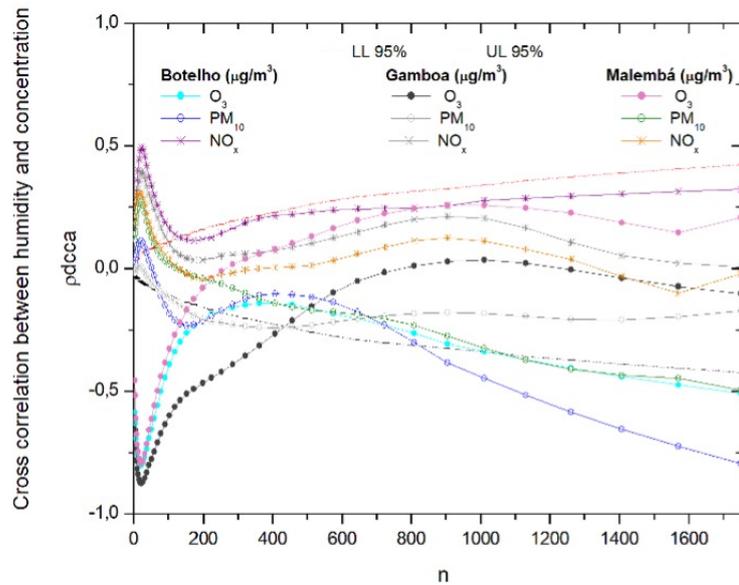


Através da Figura 5.13 é possível identificar que em todos os casos, as concentrações são descritas por expoentes de Hurst acima de 0,5, o que significa que as concentrações não seguem padrões aleatórios. Na maioria dos casos, o expoente de Hurst situa-se entre 0,5 e 1, o que significa que as concentrações têm um comportamento persistente; outros níveis mais elevados seguem, ou seja, níveis mais elevados de concentrações. Em alguns casos, é possível identificar que algumas concentrações têm um expoente de Hurst acima de 1. Isto acontece, por exemplo, na estação Botelho durante parte do ano 2019 para O₃ e MP10, embora em menor escala. Isto também acontece na estação Gamboa com MP10, mas por uma extensão de tempo menor, enquanto na estação Malembá, as provas são menores, embora também aconteça com O₃ e MP10. Um expoente Hurst superior a 1 implica que durante essas janelas deslizantes, a série é não-estacionária, o que poderia ser entendido como concentração descontrolada Wang *et al.* (2014). A figura 5.14 mostra o ρ_{DCCA} entre a velocidade do vento e as concentrações nas diferentes estações.

Figura 5.14: ρ_{DCCA} entre: a) velocidade do vento; b) temperatura; c) irradiação solar; d) umidade e concentrações nas diferentes estações (As linhas tracejadas referem-se aos níveis críticos para analisar a significância estatística das correlações, considerando um nível de confiança de 95%).







Através da Figura 5.14, identificou-se uma correlação cruzada positiva entre O₃ e a velocidade do vento, temperatura e irradiação solar para escalas temporais menores (24 h-1 dia) em todas as estações, com mais evidências na estação Gamboa. No entanto, esta correlação é mais pronunciada com a variável temperatura.

Para a variável vento, na estação de Gamboa, há uma diminuição da correlação até 400 h, permanecendo constante até 800 h, diminuindo suavemente, mas permanecendo positiva e pequena até ao final do período. Para a estação Botelho, há também um decréscimo até 400 h, mas com tendência a aumentar a correlação até ao final do período. Na estação de Malembá, há uma correlação mais baixa, permanecendo semelhante até ao final do período.

Com relação a variável temperatura, em todas as estações de monitorização, há uma diminuição da correlação até aproximadamente 200 h. Na estação de Malembá, a partir das 200 h, começa uma correlação negativa, onde para as estações Botelho e Gamboa, começa às 800 h.

Para a variável irradiação solar, na estação Botelho, tem uma correlação positiva baixa, atingindo um pico até 100 h e tornando-se negativa após 200 h. Para a estação Gamboa, um pequeno pico de correlação positiva aparece por volta das 24 h, mas rapidamente se torna negativo, voltando a ser positivo crescente por volta das 1100 h. A estação Malembá já começa com uma correlação negativa, tornando-se positiva e aumentando por volta das 200 h.

Para a variável umidade, O₃ é fortemente anti-correlação para todas as estações no espaço de um dia. Na estação de Malembá, atinge uma correlação positiva de cerca de 300 h, permanecendo positiva, mas pequena, até ao final do período. Em relação à MP10, identificou-se uma correlação cruzada negativa entre velocidade do vento, temperatura e irradiação solar para escalas temporais menores (1 dia) em todas as estações.

Para a variável do vento na estação Botelho, cerca de 100 h, a correlação torna-se positiva até ao final do período. Para a estação de Malembá, a correlação torna-se positiva a 50 h, atingindo um máximo de cerca de 500 h, depois diminui, mas permanece positiva. Na estação de Gamboa, permanece negativa até ao final do período.

A variável temperatura nas três estações apresenta correlação negativa, com um máximo de cerca de 24 h. Para a estação Botelho, começa a ser positiva por volta das 50 h, atingindo um máximo de 200 h, tornando-se negativa por volta das 800 h até ao final do período. Na estação Gamboa, começa a ser positiva por volta das 100 h, atingindo um máximo de 400 h, tornando-se negativa por volta das 1000 h. Na estação Malembá, passa a ser positiva por volta das 150 h, com tendência a aumentar até ao final do período. Com relação a irradiação solar variável, observa-se um comportamento negligenciável.

Para a variável umidade, observa-se uma correlação positiva maior para a estação Malembá, tornando-se negativa por volta das 200 h e permanecendo até ao final do período. Na estação Botelho, observa-se uma correlação positiva com um máximo em 24 h, tornando-se negativa em torno das 100 h. Na estação Gamboa, observa-se uma pequena correlação negativa durante quase todo o período. Para além disso, identificou-se uma correlação cruzada negativa entre NO_x e velocidade do vento para todas as escalas temporais em todas as estações.

Na variável temperatura, as três estações apresentam uma correlação negativa com um máximo de cerca de 24 h. Para a estação Botelho, começa a ser positiva cerca de 200 h, atingindo um máximo de 200 h, com um aumento suave até ao final do período. Na estação Gamboa, começa a ser positiva por volta das 400 h, permanecendo até ao final do período. Na estação de Malembá, começa a ser positivo por volta das 200 h, com uma ligeira tendência de crescimento até ao final do período. Na estação de Botelho, para a irradiação solar variável, observa-se um crescimento positivo de cerca de 100 h até ao final do período. Para as estações Gamboa e Malembá, existem poucas variações.

Para a variável umidade, há uma correlação positiva com um máximo de cerca de 24. Neste sentido, investigar o comportamentos do poluentes nas regiões estudadas utiliza-se dois modelos *online* e *offline* WRF/Chem e WRF/CMAQ, respectivamente, avaliando-se os seus desempenhos a seguir.

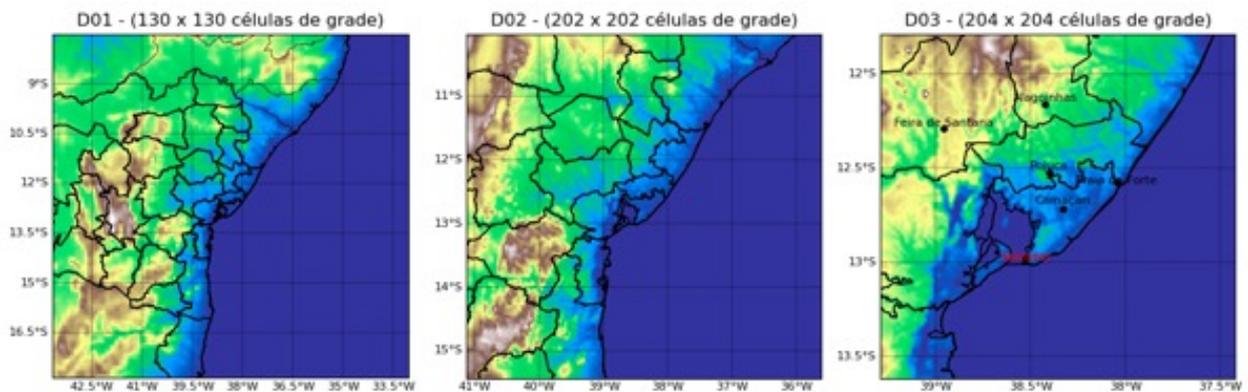
5.3 Avaliação da poluição na atmosférica utilizando o modelo WRF/Chem na RMS

Os sistemas de modelagem WRF/Chem foram configurados exclusivamente para simular as concentrações de MP10 (partículas com diâmetro aerodinâmico até 10 μm) na Região Metropolitana de Salvador (RMS) e avaliar a consistência das previsões do modelo. As opções meteorológicas, emissões antropogênicas e biogênicas foram atribuídas de forma idêntica, enquanto os processos químicos (química de gás e aerossol, deposição seca e

úmida) foram aplicados em suas próprias configurações. Essas configurações idênticas ajudam a reduzir a variabilidade do desempenho do modelo devido a efeitos meteorológicos diretos e processos de emissão. As influências meteorológicas nas simulações dos componentes químicos de MP10 podem ser atribuídas principalmente ao modo de integração física, ou seja, *online*.

Os domínios espaciais do modelo WRF/Chem (versão 3.9.1.1) cobrem a Região Metropolitana de Salvador (RMS) de maneira adequada. Para simular os campos meteorológicos com uma melhor compreensão da dinâmica atmosférica, física e dos fenômenos atmosféricos, o modelo WRF foi configurado com três domínios aninhados, com resoluções de grade de 9 km (D01 - 130 x 130 células de grade), 3 km (D02 - 202 x 202 células de grade) e 1 km (D03 - 204 x 204 células de grade), respectivamente. O domínio de interesse possui uma resolução horizontal de 1 km e 43 níveis verticais, com o modelo se estendendo até 50 hPa. O sistema WRF/Chem simulou os campos meteorológicos e as concentrações químicas nos mesmos 43 níveis verticais. A utilização de resolução vertical reduzida na grade do sistema WRF/Chem é frequentemente adotada para obter uma maior eficiência computacional. A seguir a Figura 5.15

Figura 5.15: Localização da região conforme a resolução do domínio D01 a D03.



As simulações foram realizadas para o mês de março de 2015, pois esse período foi escolhido para permitir a caracterização do fenômeno de brisa. A escolha desse mês levou em consideração a ocorrência regular e significativa das brisas marítima e terrestre nessa época do ano, o que é importante para entender os padrões de circulação atmosférica e a dispersão de poluentes na região.

No modelo WRF/Chem, foram selecionados os seguintes esquemas de parametrização física: RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model) para a radiação de ondas curtas e longas, esquema microfísico Thompson, modelo de superfície terrestre Noah-MP, esquema de cúmulos Grell-Freitas e esquema de camada limite planetária Bougeault e Lacarrere (BouLac). As emissões locais foram processadas utilizando o SMOKE (versão 4.7, disponível em <https://zenodo.org/record/4088945>) com dados de especiação provenientes dos trabalhos de Lyra (2008), Silva *et al.* (2021). O inventário detalhado de emissões é discutido em maior profundidade na seção subsequente. Os perfis temporais foram obtidos do

estudo de [Pedruzzi et al. \(2019\)](#). A especiação química foi realizada utilizando os mecanismos MOZCART (Modelo para Ozono e Traçadores Químicos Associados) [Emmons et al. \(2010\)](#) e GOCART (Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport) [Chin et al. \(2000\)](#) para química gasosa e de aerossóis, respectivamente.

O MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) foi empregado para preparar os arquivos meteorológicos exigidos pelo SMOKE, utilizando a saída do modelo WRF como entrada. As condições de contorno do sistema WRF/Chem foram definidas utilizando a ferramenta de pré-processamento MOZBC em conjunto com simulações químicas do modelo CAM-Chem [Buchholz, Emmons & Tilmes \(2019\)](#).

É importante mencionar que os dados de emissões antropogênicas utilizados como condições iniciais no modelo WRF/Chem foram gerados por meio do pré-processador de emissões químicas EPA ANTHRO EMIS. Essa ferramenta possibilita a criação de arquivos de emissões antropogênicas horárias compatíveis com o WRF/Chem a partir dos dados de saída no formato netCDF do SMOKE. Esses dados contribuem para o inventário de emissões. As emissões processadas pelo modelo SMOKE incluíam dados fornecidos pela agência ambiental local (março, ano base 2015) da RMS [Lyra \(2008\)](#), [Silva et al. \(2021\)](#). O inventário oficial de emissões foi desenvolvido com base em fatores de emissão da literatura, tais como a americana (USEPA) e agências ambientais europeias (EMEP/EEA). Além disso, o método do inventário de emissões seguiu o DARS (Data Attribute Rating), que foi um método proposto pela [EPA \(1996\)](#).

Através dessa metodologia, o inventário de emissões foi desenvolvido de acordo com os critérios do EIIP (Emissions Inventory Improvement Program) para o Nível II relativamente à garantia de qualidade e requisitos de controle de qualidade, que incluem as seguintes etapas: verificação da realidade, revisão, cálculos de amostras, análise sensível, e auditorias independentes. Finalmente, este inventário de emissões incluiu dados de oito estações localizadas na RMS (Detran, Barros Reis, Paralela-CAB, Rio Vermelho, Itaipara, Campo Grande, Pirajá e Dique do Tororó). A Tabela 5.6 resume as emissões anuais totais de partículas MP10 e MP2.5 fontes dentro da região do estudo.

Tabela 5.6: Emissão anual total de poluentes atmosféricos por setor

Setores	MP (kg/h)	MP10 (kg/h)	MP2.5 (kg/h)
Navios	2.4×10^9	n.a.	n.a.
Fontes pontuais			
Emissões veiculares	5.93×10^2	3.50×10^2	1.89×10^2
Total			

As emissões de navios foram quantificadas em toneladas anuais, considerando o ano de 2015, e levando em consideração diferentes modos de operação, incluindo navegação, atracação e manobras. Foram considerados diversos tipos de navios, tais como cargueiros gerais, navios Ro-Ro, graneleiros, navios cisterna/tanque, navios de passageiros, outros tipos de navios e navios porta-contêineres. A metodologia adotada para estimar as taxas de emissões anuais nos portos baseia-se em fatores de emissão que não segregam as partículas particuladas de acordo com o tamanho das partículas. No que se refere às emissões

veiculares, estas foram expressas em gramas por quilômetro para o ano de 2015. As emissões de material particulado (MP) englobam a totalidade das partículas resultantes do escapamento de veículos, abrangendo automóveis, veículos comerciais leves, veículos pesados e motocicletas. Adicionalmente, também foram consideradas as emissões de partículas totais em suspensão decorrentes do desgaste de pneus, freios e pistas. As emissões de MP10 e MP2.5 são específicas para o desgaste de pneus, freios e pistas, conforme a metodologia empregada. Todos os produtos químicos utilizados nesta modelação foram obtidos a partir de perfis de literatura, especificamente, a base de dados EPA SPECIATE 5.0, uma vez que não existe nenhum perfil químico observado para as fontes na região. Na seção anterior, realizou-se uma análise meticulosa das condições meteorológicas, cuja distribuição espacial foi cuidadosamente investigada. Esse estudo é crucial, uma vez que tais condições exercem influência direta sobre as flutuações temporais na concentração de poluentes. Para elucidar de maneira mais eficaz os resultados da simulação, apresenta-se na Figuras 5.20 o comportamento.

A fim de se manter a simplicidade, optou-se por utilizar a média temporal ao longo de um mês específico, sendo este o mês de março de 2015. Durante esse período, observou-se com atenção a velocidade, direção do vento, vapor d'água e temperatura. A geração dos dados meteorológicos se deu por meio do modelo WRF. Para garantir a precisão, contrastamos as simulações com as medições reais fornecidas pela CETREL, que faz parte da Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar. Durante esse processo, utilizamos duas parametrizações distintas para enriquecer nossa análise.

Figura 5.16: Apresenta os valores médios diários de concentração de ozônio O_3 , medidos em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e dióxido de nitrogênio NO_2 , também em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no eixo y. No eixo x, são representados os dias do mês de março de 2015. Esses valores foram obtidos a partir dos dados simulados e observados, coletados em todas as estações de monitoramento durante o período indicado. .

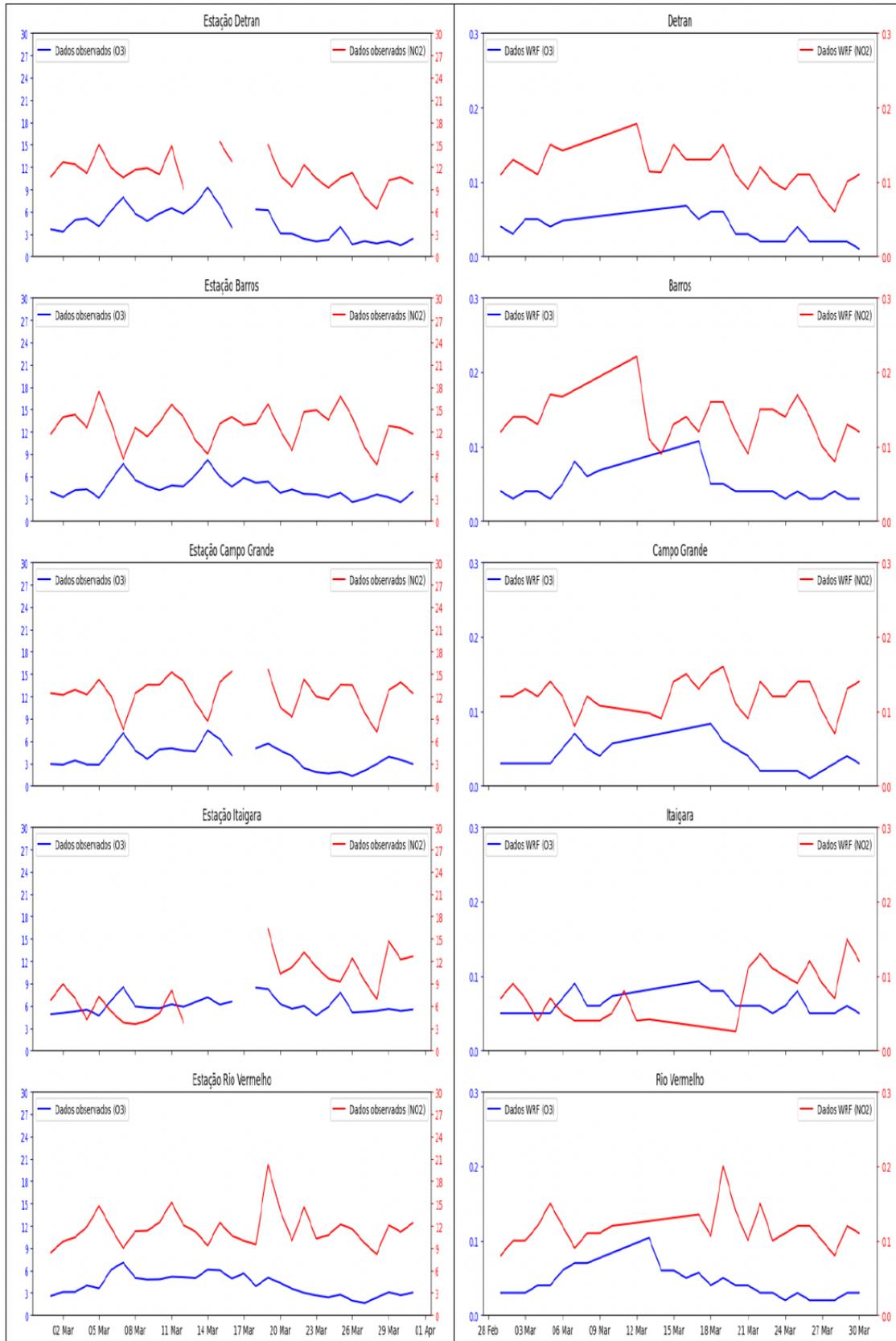
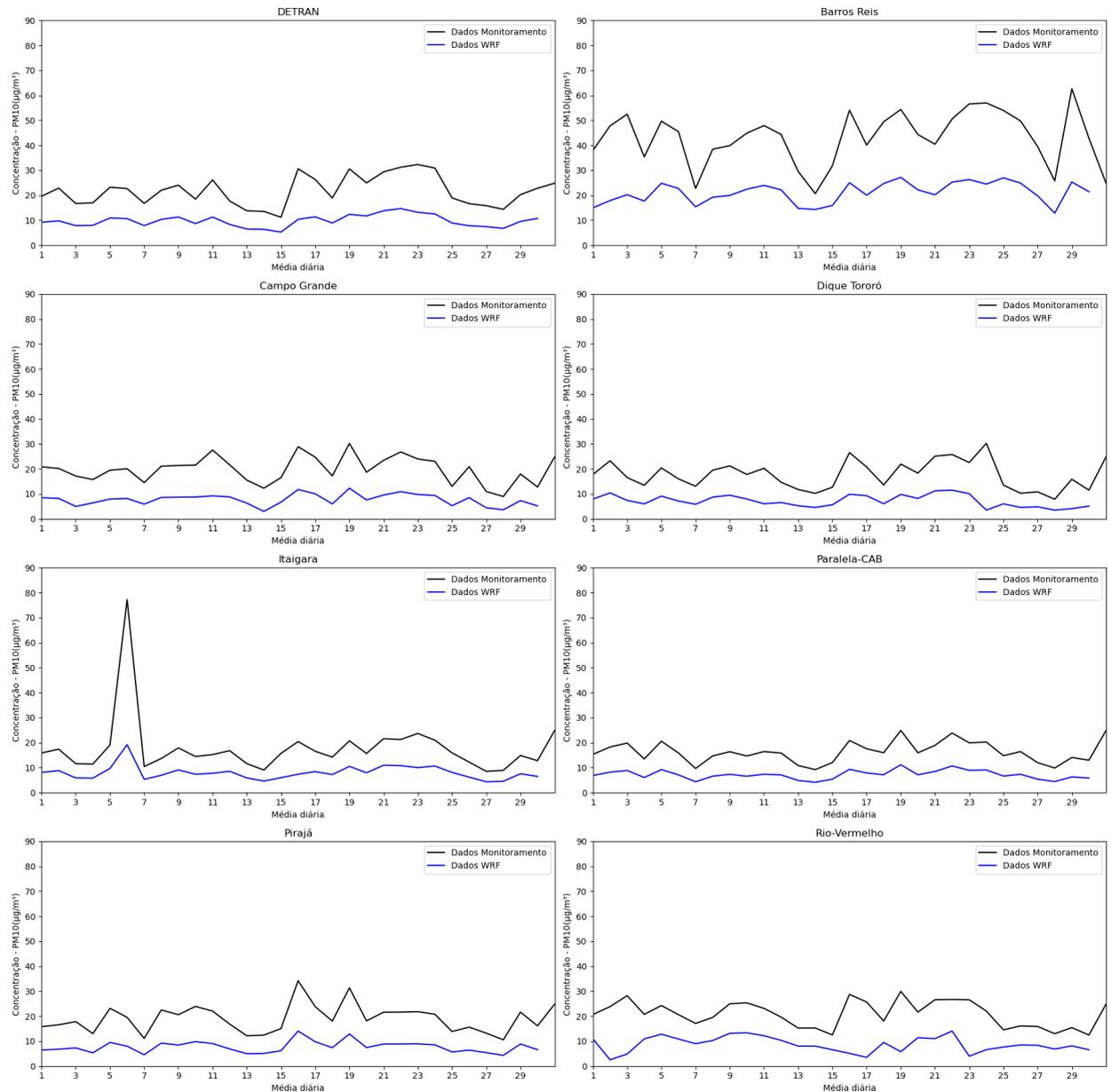


Figura 5.17: Apresenta os valores médios diários de concentração de MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para o mês de março de 2015. Esses valores foram obtidos a partir dos dados simulados e observados coletados em todas as estações de monitoramento.



As Figuras 5.16 e 5.17 revelam que o desempenho do modelo de qualidade do ar apresentou flutuações entre as várias estações de monitoramento. Foi observado que o modelo WRF/Chem tendeu a subestimar as concentrações de poluentes registradas em todas as estações. A causa dessa subestimação pode estar relacionada à ausência de um inventário de emissões integral e robusto para a região em estudo.

Vale ressaltar que esta é a primeira instância na literatura científica onde tal modelo é aplicado a esta região específica, fazendo uso de um inventário local baseado em espécies de emissões. No estudo anterior realizado por [Andreão & Albuquerque \(2021\)](#), o mesmo modelo WRF/Chem foi utilizado, no entanto, contou com a vantagem de um inventá-

rio completo de emissões para a região de Vitória e a incorporação de um mecanismo de simulação alternativo. Este enfoque resultou em uma análise de dados mais precisa e confiável. É importante enfatizar que o inventário de emissões aplicado nesta análise será refinado em futuras pesquisas, potencialmente melhorando a acurácia dos resultados obtidos. Prosseguindo, será avaliado o desempenho estatístico por meio dos seguintes índices: FAT2, Cor, Fb, Fs e Nmse, conforme estabelecido por [Hanna & Paine \(1989\)](#). Esses indicadores estão detalhados nas Tabelas 5.7, 5.8 e 5.9 são utilizados para estimar as concentrações dos modelos. As concentrações de MP10 foram avaliadas considerando a média diária.

Tabela 5.7: Índices estatísticos referentes às concentrações médias diárias de MP10 na RMS.

Estação	FAT2	Cor	FB	FS	NMSE
Itaigara	0.23	0.91	0.68	0.65	0.04
Paralela-CAB	0.04	1.00	0.74	0.25	0.18
Pirajá	0.18	1.00	0.81	0.28	0.15
Rio Vermelho	0.15	0.03	0.78	0.24	0.23
Detran	0.23	0.95	0.73	0.26	0.15
Barros Reis	0.15	0.89	0.67	0.25	0.17
Campo Grande	0.17	0.96	0.84	0.26	0.18
Dique Tororó	0.18	0.65	0.81	0.31	0.14

Tabela 5.8: Índices estatísticos referentes às concentrações médias diárias de O3 na RMS.

Estação	FAT2	Cor	FB	FS	NMSE
Barros Reis	0,00	0,96	1,95	-12,77	103,38
Campo Grande	0,00	0,98	1,95	-6,05	112,27
Detran	0,00	0,99	1,96	-4,50	120,94
Itaigara	0,00	0,96	1,96	-32,70	100,27
Rio Vermelho	0,00	0,98	1,95	-7,24	110,30

Tabela 5.9: Índices estatísticos referentes às concentrações médias diárias de NO2 na RMS.

Estação	FAT2	Cor	FB	FS	NMSE
Barros Reis	0,00	0,99	1,96	-28,14	101,49
Campo Grande	0,00	0,98	1,96	-32,69	100,33
Detran	0,00	0,99	1,96	-29,66	101,61
Itaigara	0,00	0,99	1,96	-5,26	114,04
Rio Vermelho	0,00	0,99	1,96	-20,85	102,64

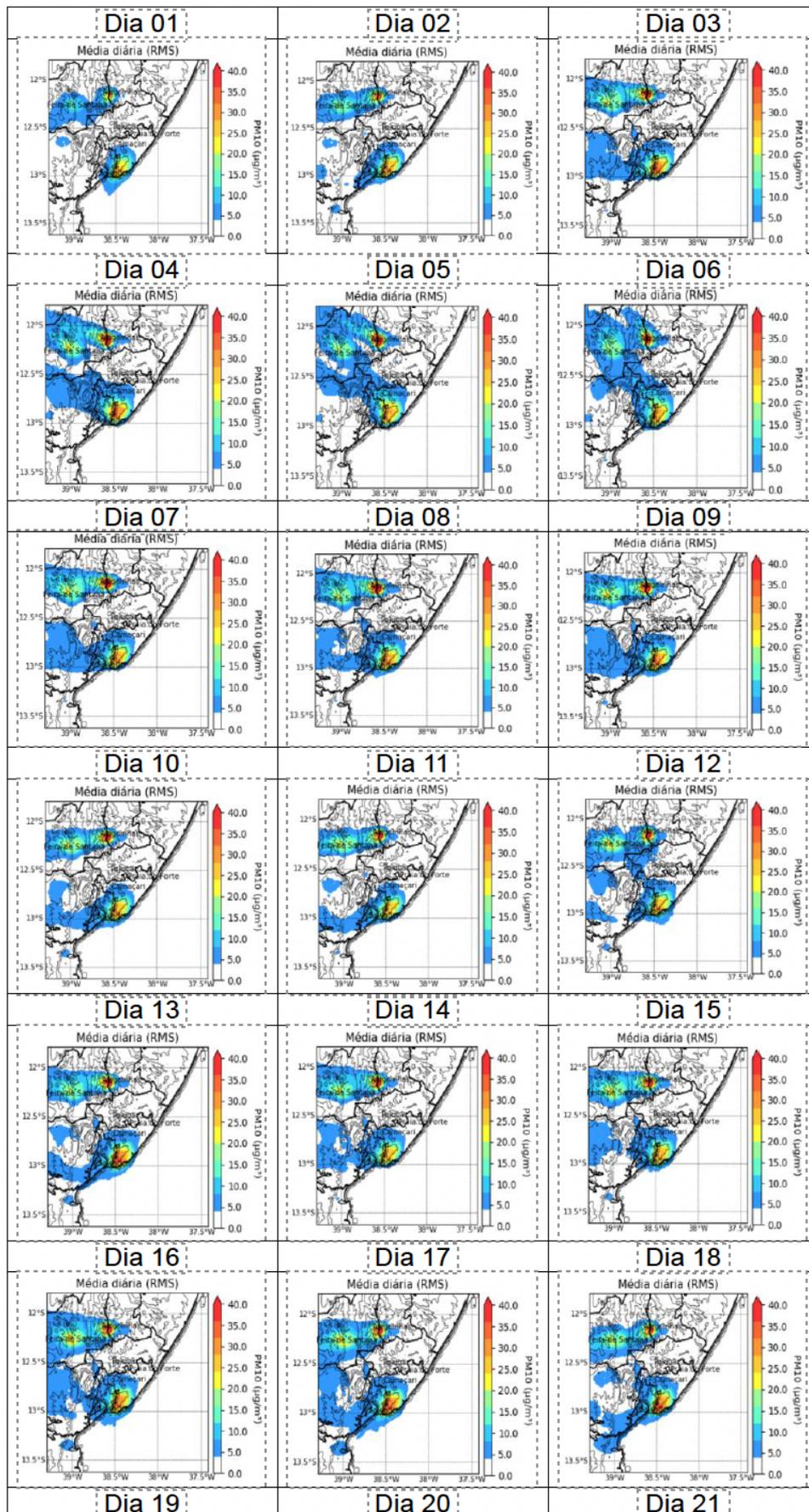
A análise dos dados apresentados na Tabela 5.7, 5.8 e 5.9 indica que o índice (NMSE), idealmente com valor 0, nunca ultrapassou 0.23 para o modelo WRF/Chem em qualquer estação. A estação Itaigara obteve destaque com um NMSE de apenas 0.04, contrastando com a estação Rio Vermelho que registrou o maior valor, 0.23. No que tange ao (FB), cuja variação oscila entre -2 a +2 e tendo o 0 como valor ideal, o modelo WRF/Chem atingiu uma marca igual ou inferior a 0.84 em todas as estações. A melhor performance foi registrada na estação Barros Reis com um FB de 0.67, enquanto a estação Campo Grande apresentou a marca mais elevada, 0.84. Em relação ao índice FAT2, que avalia a proporção de previsões que estão dentro de um fator de dois em relação aos valores

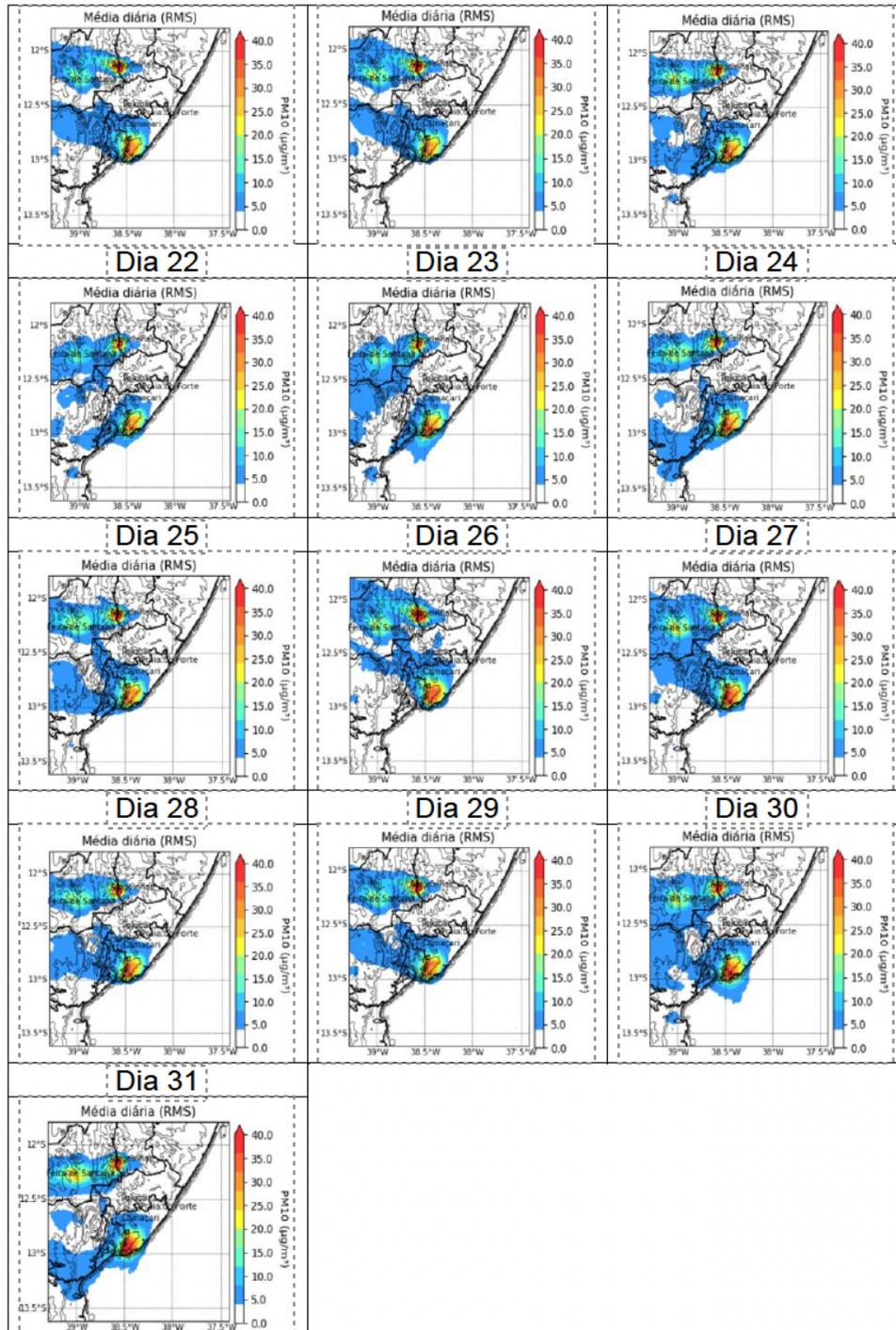
observados, todas as estações com o modelo WRF/Chem mostraram um valor igual ou abaixo de 0.23. A estação Rio Vermelho destacou-se com um FAT2 de 0.04, ao passo que as estações Itaipara e Detran exibiram o menor valor, 0.23. Considerando o (COR), que varia de -1 a 1, o modelo WRF/Chem não ultrapassou o valor 1 em nenhuma das estações. A estação Paralela-CAB obteve a melhor performance com um COR de 0.03. No entanto, as estações Paralela-CAB e Pirajá mostraram os resultados menos satisfatórios. Os dados de NMSE para as previsões das concentrações de (O₃) e (NO₂) em diversas estações de monitoramento indicam um desvio significativo em relação aos dados observados.

Com isso, é especialmente evidente na estação Detran, onde os valores de NMSE foram 120.95 para O₃ e 101.61 para NO₂, destacando previsões consideravelmente distantes dos dados reais. As estações Barros Reis, Campo Grande, Itaipara e Rio Vermelho apresentam situação similar, com NMSE variando de 100.27 a 114.05. Para isso, sugere-se a necessidade de melhorias no modelo preditivo ou a busca por novas abordagens. Os valores do Bias Factor (FB) para as previsões de O₃ e NO₂ são consistentemente próximos de 2 em todas as estações, indicando uma superestimação sistemática. Com isso, sugere-se que existe um fator não considerado no modelo que está afetando os dados reais. Portanto, uma calibração adequada do modelo e a identificação deste fator ausente poderiam aprimorar as previsões.

A análise de correlação mostra uma forte correlação positiva entre as previsões e os dados observados, com valores superiores a 0.96 para todas as substâncias e estações. Isso demonstra que, apesar da superestimação sistemática, o modelo consegue captar de maneira precisa a variação nos níveis de poluentes. Contrastando com o bom resultado do FB, o índice FAT2, é zero para todas as estações e poluentes, indicando a baixa precisão do modelo em termos absolutos, a despeito da boa correlação. Isso aponta para a necessidade de ajustes significativos para melhorar as previsões. Esses resultados, considerando a complexidade orográfica da cidade e o fato de se tratar de uma área costeira urbana constantemente submetida a fenômenos de brisa marítima [Salvador *et al.* \(2016b\)](#), [Salvador *et al.* \(2016a\)](#), são considerados geralmente aceitáveis. Em seguida, a Figura 5.18 exhibe o campo de concentração horizontal, com os valores médios diários de MP10 para a RMS durante todo o mês de março de 2015.

Figura 5.18: O campo de concentração horizontal, com os valores médios diários de MP10 para a RMS, durante o mês de março de 2015.

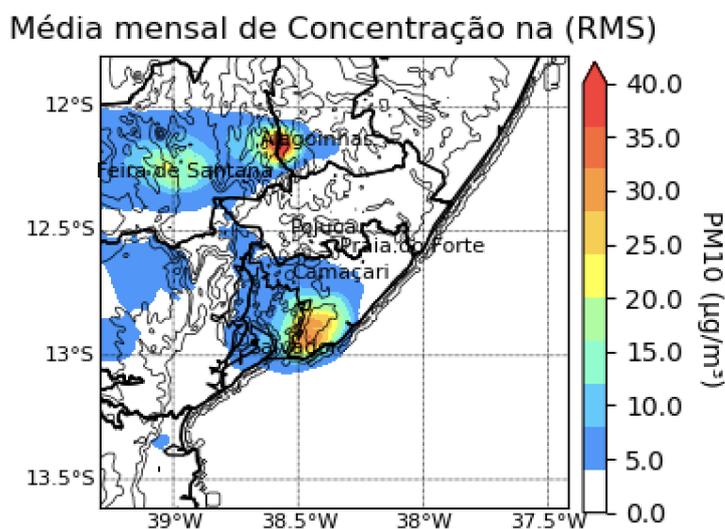




A análise visual das médias diárias e a coerência encontrada entre os dados locais e globais, em conformidade com a literatura, são sinais promissores para a eficácia do modelo que você está utilizando. O dia 31 de março, onde você destacou a ocorrência de eventos de brisa marítima, parece ser um exemplo particularmente bom de onde as características dos dados são consistentes com as expectativas baseadas na literatura. Ao comparar dados locais com dados globais, é importante considerar as possíveis variações que podem existir devido a fatores locais específicos, como geografia, temperatura, umidade, padrões climáticos e assim por diante. Esses fatores podem influenciar a forma como os eventos

atmosféricos, como a brisa marítima, ocorrem e são capturados pelos dados. Continuar avaliando a coerência do seu modelo com a literatura e com os padrões esperados é um passo crítico na validação do seu trabalho. No entanto, para uma análise mais completa, você pode querer considerar também técnicas de validação quantitativa, como cálculo de erros de previsão, coeficientes de correlação, entre outros. Por fim, é importante lembrar que a qualidade dos dados de entrada é crucial para a confiabilidade dos resultados do modelo. Se os dados de entrada são consistentes e de alta qualidade, é mais provável que o modelo possa gerar previsões precisas e úteis. A figura subsequente ilustra a média mensal de partículas MP10 na região em estudo. Com a figura a seguir, concluímos a avaliação visual da dispersão dessas partículas na atmosfera da região.

Figura 5.19: O campo de concentração horizontal, com os valores médios mensais de MP10 para a Região Metropolitana de Salvador durante todo o mês de março de 2015



A figura 5.19 subsequente ilustra a média mensal de partículas MP10 na região em estudo. Este resultado apresenta uma notável coerência com as demais médias reportadas e com os dados observacionais disponíveis. Portanto, com essa representação, concluímos a avaliação visual da dispersão dessas partículas na atmosfera da região. Cabe salientar que, apesar da coerência dos resultados encontrados, há ainda a necessidade de melhorias nos inventários. A inclusão de outras fontes de partículas, conforme exemplificado pelo inventário de Vitória, poderia contribuir para uma compreensão mais precisa e abrangente da dispersão de partículas MP10 na região em estudo.

5.4 Avaliação do impacto do efeito de brisa na poluição atmosférica na RMS

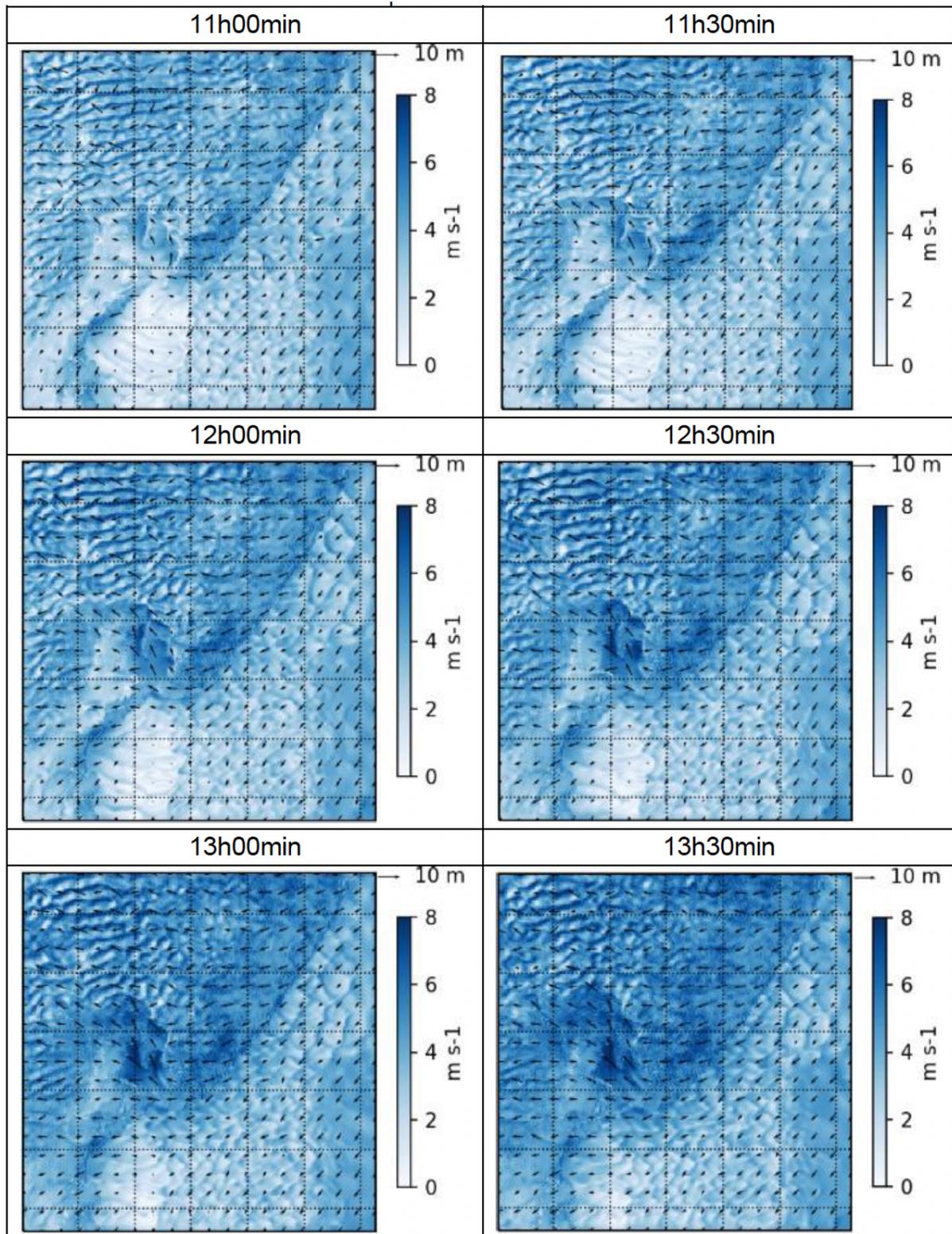
Este estudo enfoca também a análise de um fenômeno específico: a influência da brisa marítima na circulação local e o impacto consequente na dispersão de poluentes atmosféricos. No entanto, uma análise mais aprofundada depende de medidas provenientes de LIDAR e/ou SODAR, os quais não estão disponíveis na região de estudo. Assim, tem-se uma análise mais qualitativa que quantitativa do fenômeno de brisa marítima. Os poluentes são transportados a longas distâncias por meio de um campo de vento de grande escala. A dispersão desses poluentes é consequência de uma complexa rede de vórtices de múltiplas dimensões, gerados por desequilíbrios em escalas maiores devido a uma variedade de fatores. Estes incluem diferenciais térmicos, características do terreno, diferentes tipos e usos do solo, entre outros [Stull \(1988\)](#).

Esses elementos resultam em turbulências e movimentos em menor escala que desempenham um papel crucial na dispersão dos poluentes. No entanto, é importante considerar outros fatores, como a brisa marítima, que pode ocasionalmente intensificar as concentrações de poluentes. Esta situação pode levar a desconfortos e danos à saúde dos indivíduos que vivem próximos às fontes de emissão [Borrego et al. \(2010\)](#).

O objetivo principal desta análise foi avaliar a entrada da brisa marítima utilizando as parametrizações ACM2 (CLP) e Noah (Land use) no modelo de mesoescala WRF, para fornecer insights que possam influenciar futuros estudos na investigação dos efeitos de brisa na dispersão dos poluentes na RMS. Esses fenômenos tendem a ser de curta duração, e a dificuldade de se obter dados experimentais por conta dos custos e dependências das condições meteorológicas, torna a tarefa ainda mais desafiadora [Salvador et al. \(2016b\)](#), [Salvador et al. \(2016a\)](#).

Por isso, este estudo focou em buscar oferecer resultados qualitativos a partir de uma modelagem numérica comparativa utilizando dados experimentais simulados no WRF durante o dia 31/03/2015 na RMS e uma melhor caracterização do fenômeno. A Figura 5.20 mostra o campo de velocidades horizontal simulado em uma grade (D03) de 204 x 204 km em intervalos de 30 min das 11h00min às 13h30min.

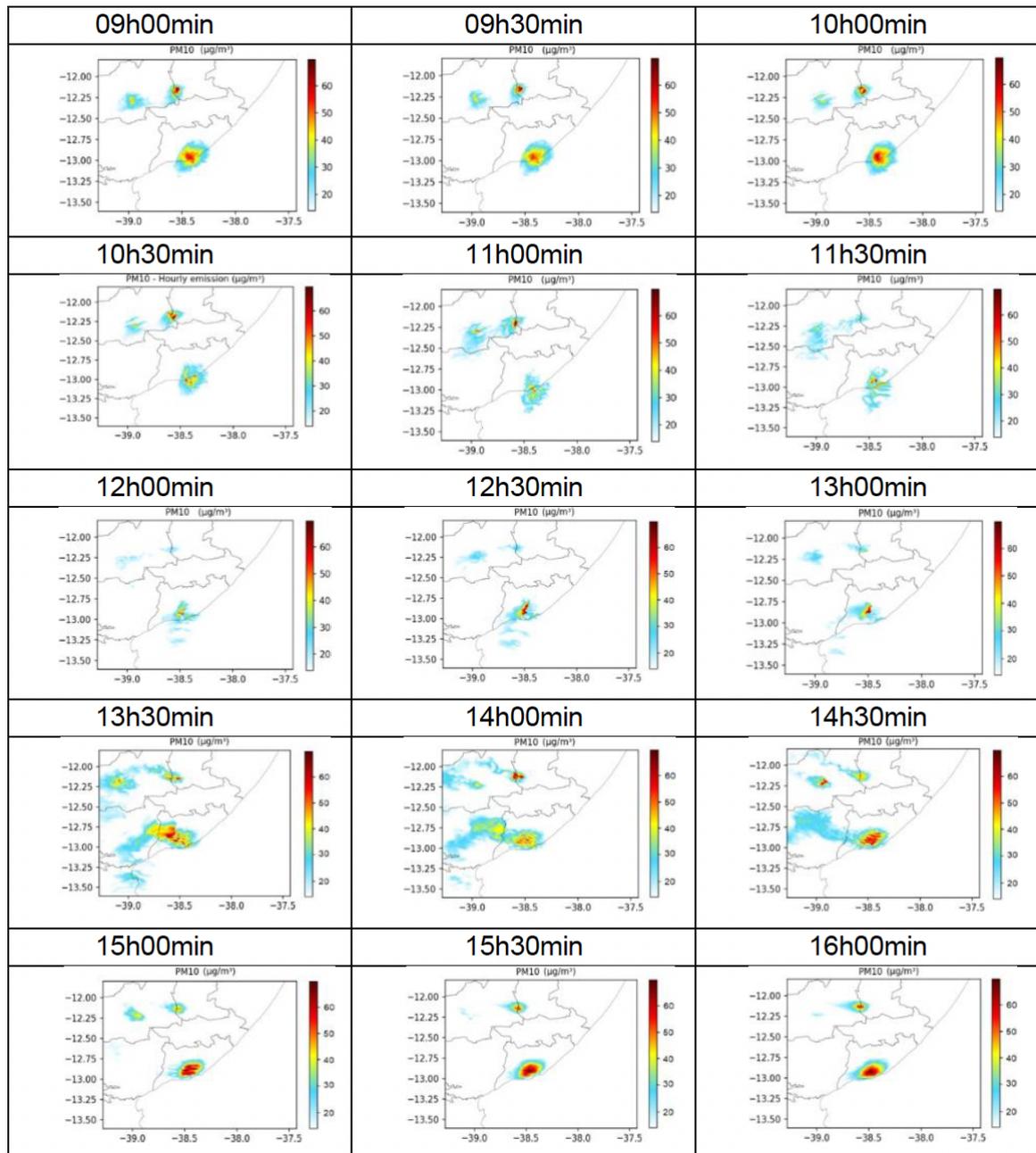
Figura 5.20: Vetores do campo horizontal do vento na superfície em uma grade de 204 km x 204 km na RMS utilizando intervalos de 30 minutos para cálculo das médias no dia 31/03/2015.



Na 5.20 observa-se a entrada de brisa marítima entre 11h00min e 13h30min, caracterizada

pela mudança na direção e velocidade do vento (mar-terra durante o dia). Este fenômeno pode influenciar a qualidade do ar na região, sendo fundamental para a compreensão da dinâmica da dispersão de poluentes em áreas costeiras. A Figura 5.21 mostra-se as médias das concentrações do dia 31/03/2015 para MP10 utilizando o modelo WRF/Chem.

Figura 5.21: Médias das concentrações ao nível do solo no dia 31/03/2015 para MP10 utilizando o modelo WRF/Chem



Ao avaliar a intensidade, direção e velocidade média do vento em intervalos de 30 minutos na RMS (Figura 5.21), o modelo mostrou precisão na caracterização do fenômeno. Entre 11h00min e 13h30min captou-se uma diluição da concentração de material particulado com a entrada da brisa, o que foi benéfico em termos de poluição do ar. No entanto,

por volta das 13h30min percebe-se uma forte influência da Baía de Todos os Santos na circulação local, resultando no direcionamento da pluma para regiões além da RMS. Por volta das 15h00min, com a diminuição da velocidade do vento e da brisa marítima, percebe-se um aumento da concentração localizada na cidade de Salvador. Apesar de baseadas em apenas um dia, as inferências geradas pelo modelo WRF/Chem retrataram de maneira satisfatória a dinâmica atmosférica e dos poluentes da região em estudo. O estudo mostra a necessidade de equipamentos mais sofisticados (LIDAR e SODAR) para avaliar a dinâmica da estrutura da CLP e CLI na região de estudo, em função do fenômeno de brisa marítima [Salvador *et al.* \(2016b\)](#), [Salvador *et al.* \(2016a\)](#). Apesar desta fragilidade, esta avaliação qualitativa mostrou o potencial da modelagem computacional em problemas de alta complexidade.

Sumário e Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o desempenho do modelo de qualidade do ar WRF/Chem para a determinação do campo de concentração superficial de poluentes atmosféricos na RMS, com particular atenção ao MP, O₃ e NO_x. Neste sentido, primeiramente foram realizadas comparações entre os modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ na RMV a fim de verificar a consistência do modelo com dados de um inventário de fontes consolidado, além de avaliar se os resultados dos modelos são similares. Após esta análise, foi realizada uma avaliação com os métodos DFA e ρ_{DCCA} nos dados meteorológicos e de concentração disponíveis na RMS, a fim de avaliar a persistência e correlações entre concentração e variáveis climáticas na região do Porto de Aratu. Por fim, após estas análises, foram realizadas simulações na RMS usando o modelo WRF/Chem comparando com dados medidos de concentração disponíveis e, devido à falta de dados de instrumentos de medição (SODAR ou LIDAR), somente uma análise qualitativa da brisa marítima e sua influência no processo de dispersão na região. Portanto, as principais conclusões são:

i) Comparação dos modelos WRF/Chem e WRF/CMAQ na RMV

Em geral, a análise do desempenho estatístico dos modelos (MP10 e MP2.5) mostrou que ambos apresentaram resultados com ordens de grandeza semelhantes, mas indicaram que houve uma dispersão considerável entre os dados simulados e observados na região do estudo. Neste sentido, os modelos foram capazes de reproduzir satisfatoriamente o período simulado, com melhores resultados de concentração superficial para o sistema WRF/Chem e uma maior tendência para subestimação do sistema WRF/CMAQ. Estas diferenças nos resultados podem ser atribuídas às diferentes parametrizações físicas, aos mecanismos químicos e às características online e offline dos modelos, incluindo as condições de fronteira.

O mecanismo utilizado no sistema WRF/Chem é o MOZART, que está acoplado ao esquema de aerossol ao GOCART. Por outro lado, o modelo CMAQ tem o mecanismo CB06 numa tentativa de estimar melhor a altura das emissões de poluentes das respectivas fontes. Além disso, as incertezas nas simulações da qualidade do ar estão relacionadas com uma série de fatores tais como variabilidade espacial, inventário de emissões, meteorologia, parâmetros do mecanismo químico e rotinas numéricas. Especificamente, outras discrepâncias nos resultados podem estar relacionadas com a existência de algumas pequenas lacunas nas séries de dados medidos, localização inadequada do equipamento de medição meteorológica, bem como a comparação a baixa altitude devido à distorção na integração da topografia (orografia), variações acentuadas nas características aerodinâmi-

cas (ou seja, comprimento da rugosidade), e devido a heterogeneidades no uso do solo e tipo de solo (temperatura e umidade). Além disso, o inventário de emissões que foi gerado pela agência de proteção ambiental local (IEMA) utilizou os fatores de emissão recomendados pelas agências ambientais americanas e europeias. De fato, a maioria dos estudos foi realizada nos EUA ou Europa, mas informações sobre emissões de tráfego em áreas com alta densidade populacional na África, Ásia e América do Sul, por exemplo, são escassas.

Além disto, é importante salientar que um fator limitativo para a utilização e aplicação deste tipo de estudo com modelos de transporte químico no Brasil é a falta de uma base de dados oficial e consolidada de emissões, e a falta de padronização da informação sobre as características de cada grupo fonte, tais como a especificação química, a evolução temporal, e a distribuição espacial dentro de um domínio de grade a ser simulado. Toda esta informação acrescenta um fator de complexidade à elaboração de inventários representativos das emissões locais, mostrando ser um trabalho de melhoria contínua. Neste aspecto, este trabalho foi um passo importante para novos estudos sobre o impacto das emissões antrópicas locais na qualidade do ar na RMV, uma vez que as maiores dificuldades enfrentadas se devem à escassez de informação sobre as fontes de emissões na região, além da falta de dados medidos sobre as concentrações de poluentes nas estações de monitoramento distribuídas na região. Do ponto de vista da modelagem numérica, as diferenças entre os modelos podem ser significativas, o que pode causar estimativas erradas numa dada região, com especial preocupação pelas estimativas com subestimação das concentrações.

ii) Avaliação dos dados com os métodos DFA e o coeficiente ρ_{DCCA} na RMS

Após as análises exploratórias, foi possível identificar uma influência persistente das variáveis meteorológicas no processo de poluição, considerando todo o período analisado. Os estudos mostram que a análise de dados pode orientar ações de controle ao longo do tempo. Neste sentido, as concentrações de O₃, NO_x e MP₁₀ na RMS foram na sua maioria persistentes, mas com alguns períodos em que a dinâmica do sistema é caracterizada como não estacionária (regime transitório ou condições transitórias). É importante mencionar que os poluentes NO_x tiveram sempre um comportamento persistente em todas as estações de monitoramento. Além disso, houve uma maior correlação entre concentração de O₃ e vento e temperatura nas três estações de monitoramento analisadas. É importante destacar a forte correlação negativa entre a umidade e a concentração de O₃ para todas as estações de monitoramento.

Utilizando o método DFA, foi possível identificar em todos os casos que as concentrações são descritas por expoentes de Hurst acima de 0,5, o que significa que as concentrações não seguem padrões aleatórios. Na maioria dos casos, o expoente de Hurst situa-se entre 0,5 e 1, o que significa que as concentrações têm um comportamento persistente; outros níveis mais elevados seguem, ou seja, níveis mais elevados de concentrações. Em alguns casos, o expoente Hurst é superior a 1, o que implica que durante essas janelas deslizantes,

a série é não-estacionária, o que poderia ser entendido como concentração descontrolada. Por outro lado, a metodologia foi capaz de perceber a correlação entre as variáveis meteorológicas estudadas e o processo de poluição até certo ponto; os resultados mostram coerência física para os eventos meteorológicos estudados.

Os resultados demonstram que uma redução das emissões poluentes na região estudada poderia ser estimulada pela agência ambiental do Estado, particularmente em relação ao NO_x (precursor do O₃), persistente em todos os meses do ano. Este tipo de poluente provém de emissões veiculares, particularmente de veículos pesados (caminhões, guas, tratores), e de processos industriais, além das emissões de navios manobrados e atracados. Neste sentido, este trabalho representa um avanço importante, pois é a primeira vez que se realiza uma análise estatística mais aprofundada nesta região portuária. Desta forma, os resultados poderiam servir de base para um estudo mais amplo com o objetivo de delinear estratégias mitigadoras e práticas eficazes para reduzir o impacto das emissões tanto do transporte marítimo, como de todas as atividades portuárias associadas, promovendo uma melhor gestão e proteção da qualidade do ar na região.

Este documento apresenta uma abordagem sem precedentes, enfatizando a dificuldade de acesso a uma base de dados de qualidade do ar por um período mais longo, sendo que esta análise é restrita aos domínios da Autoridade Portuária. A avaliação contínua da qualidade do ar é importante para a comunidade local; mesmo com esta importância, devido ao custo de operação e ao fim da obrigação legal que criou o grupo de trabalho responsável pela sua operação, estas estações deixaram de funcionar em fevereiro de 2020. As autoridades enfrentam a necessidade de equilibrar as preocupações entre os impactos conhecidos sobre a saúde humana e o ambiente com a melhoria ou manutenção do desenvolvimento econômico; a utilização da ciência é fundamental para esse equilíbrio. Assim, acredita-se que a metodologia adotada neste trabalho pode servir como outra forma de análise deste tipo de evento para instituições privadas e governamentais e investigadores interessados no tema. Um trabalho futuro deve abordar a análise de outras estações de monitoramento implantadas em diferentes zonas do RMS, bem como a utilização do estado da arte em modelos numéricos (dispersão meteorológica e poluentes) para avaliar se estes modelos captam eficazmente os processos de longo alcance percebidos nos dados medidos na região do estudo.

iii) Avaliação da poluição na atmosférica utilizando o modelo WRF/Chem na RMS

Observou-se que a simulação de poluentes na RMS utilizando o sistema de modelagem WRF/Chem foi um passo significativo para a melhor compreensão das complexidades envolvidas na dinâmica de qualidade do ar desta região. Apesar das subestimações das concentrações de poluentes, esta é a primeira vez que o modelo WRF/Chem foi aplicado nessa região específica, demonstrando assim o potencial e sua relevância em estudos futuros. A complexidade da configuração utilizada e a abrangência geográfica coberta pelo modelo WRF/Chem evidenciam a sua aplicabilidade em diversos cenários.

A inclusão dos dados de emissões fornecidos pela agência ambiental local permitiu uma boa representação das fontes de emissão existentes na RMS. No entanto, o trabalho sugere que a precisão das previsões do modelo melhore ainda mais com o aperfeiçoamento do inventário de emissões em pesquisas futuras. Além disto, os resultados estatísticos revelaram flutuações em diferentes estações de monitoramento, indicando áreas de possível aprimoramento para simulações futuras, como a utilização de um inventário de emissões mais robusto e integral para a região em estudo. Embora ainda haja espaço para melhorias, os resultados obtidos neste estudo fornecem uma base sólida para futuras pesquisas nesta área. O trabalho aqui proposto evidenciou um avanço no conhecimento acerca da qualidade do ar e da dispersão de poluentes na RMS, indicando a importância para o planejamento e gestão ambiental, na formulação de políticas públicas eficientes e, conseqüentemente, para a melhoria da qualidade de vida dos habitantes da região, de ferramentas computacionais que representam o estado da arte em dispersão de poluentes atmosféricos.

iv) A brisa marítima na RMS

A modelagem numérica implementada, aliada à análise qualitativa, revelou uma circulação local influenciada pela BTS que desempenha um papel crucial na dispersão dos poluentes na RMS. Os resultados obtidos, apesar de se basearem em uma análise mais qualitativa que quantitativa, mostraram-se satisfatórios na representação da dinâmica atmosférica, e apontam para a necessidade de equipamentos mais avançados, tais como LIDAR e SODAR, para uma avaliação qualitativa e quantitativa da dinâmica da estrutura da CLP e CLI em função do fenômeno da brisa marítima na RMS.

A modelagem numérica adotada neste trabalho demonstrou ser uma ferramenta poderosa na caracterização do fenômeno, fornecendo uma valiosa compreensão dos efeitos da brisa marítima na dispersão dos poluentes. A concentração localizada e o direcionamento da pluma para regiões além da RMS evidenciam a complexidade e especificidade da região em estudo. Desta forma, esta pesquisa contribui significativamente para a compreensão da dinâmica da dispersão de poluentes em áreas costeiras, e sugere direções futuras para uma investigação mais abrangente e detalhada. O desenvolvimento de métodos quantitativos e a incorporação de tecnologias mais sofisticadas podem aprimorar ainda mais nossa compreensão sobre este fenômeno, onde tais insights são essenciais não apenas para a pesquisa acadêmica, mas também para o desenvolvimento de políticas e práticas eficazes em gestão ambiental, particularmente na região de estudo.

Referências Bibliográficas

- ADHIKARI, Pramod; MEJIA, John F. Impact of transported dust aerosols on precipitation over the nepal himalayas using convection-permitting wrf-chem simulation. *Atmospheric Environment: X*, Elsevier, v. 15, p. 100179, 2022.
- ANDREÃO, Willian L; ALBUQUERQUE, Taciana TA; KUMAR, Prashant. Excess deaths associated with fine particulate matter in brazilian cities. *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 194, p. 71–81, 2018.
- ANDREÃO, Willian Lemker; ALBUQUERQUE, Taciana Toledo de Almeida. Avoidable mortality by implementing more restrictive fine particles standards in brazil: An estimation using satellite surface data. *Environmental Research*, Elsevier, v. 192, p. 110288, 2021.
- ANDREÃO, Willian Lemker *et al.* Top-down vehicle emission inventory for spatial distribution and dispersion modeling of particulate matter. *Environmental Science and Pollution Research*, Springer, v. 27, n. 29, p. 35952–35970, 2020.
- ANJOS, Max; LOPES, Antônio. Sea breeze front identification on the northeastern coast of brazil and its implications for meteorological conditions in the sergipe region. *Theoretical and Applied Climatology*, Springer, v. 137, n. 3, p. 2151–2165, 2019.
- ANJOS, Max *et al.* Sea breeze front and outdoor thermal comfort during summer in northeastern brazil. *Atmosphere*, MDPI, v. 11, n. 9, p. 1013, 2020.
- ANJOS, Priscilla Sales dos *et al.* Long-term correlations and cross-correlations in wind speed and solar radiation temporal series from fernando de noronha island, brazil. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 424, p. 90–96, 2015.
- ARAVIND, Arun *et al.* Impact of land surface processes on the simulation of sea breeze circulation and tritium dispersion over the kaiga complex terrain region near west coast of india using the weather research and forecasting (wrf) model. *Atmospheric Environment: X*, Elsevier, v. 13, p. 100149, 2022.
- ARRILLAGA, Jon A *et al.* Analyzing the synoptic-, meso-and local-scale involved in sea breeze formation and frontal characteristics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 125, n. 4, p. e2019JD031302, 2020.
- AUGUSTIN, Patrick *et al.* Impact of sea breeze dynamics on atmospheric pollutants and their toxicity in industrial and urban coastal environments. *Remote Sensing*, MDPI, v. 12, n. 4, p. 648, 2020.
- AZMI, Sahir; SHARMA, Mukesh; NAGAR, Pavan Kumar. Nmvoc emissions and their formation into secondary organic aerosols over india using wrf-chem model. *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 287, p. 119254, 2022.
- AZORIN-MOLINA, Cesar *et al.* High resolution hirlam simulations of the role of low-level sea-breeze convergence in initiating deep moist convection in the eastern iberian peninsula. *Boundary-layer meteorology*, Springer, v. 154, n. 1, p. 81–100, 2015.

- BINKOWSKI, Francis S; ROSELLE, Shawn J. Models-3 community multiscale air quality (cmaq) model aerosol component 1. model description. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 108, n. D6, 2003.
- BISWAL, Akash *et al.* Covid-19 lockdown-induced changes in no₂ levels across india observed by multi-satellite and surface observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Copernicus GmbH, v. 21, n. 6, p. 5235–5251, 2021.
- BORREGO, C *et al.* Modelling the photochemical pollution over the metropolitan area of porto alegre, brazil. *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 44, n. 3, p. 370–380, 2010.
- BRITO, Andrea de Almeida; ARAÚJO, Heráclio Alves de; ZEBENDE, Gilney Figueira. Detrended multiple cross-correlation coefficient applied to solar radiation, air temperature and relative humidity. *Scientific reports*, Nature Publishing Group, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2019.
- BUCHHOLZ, RR; EMMONS, LK; TILMES, S. *The CESM2 Development Team: CESM2. 1/CAM-chem Instantaneous Output for Boundary Conditions, UCAR/NCAR–Atmospheric Chemistry Observations and Modeling Laboratory, Subset used Lat: 10 to 80, Lon:- 20 to 50, December 2014–January 2017.* 2019.
- CALDEIRA, R; FERNÁNDEZ, I; PACHECO, JM. On nao's predictability through the dfa method. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Springer, v. 96, n. 3, p. 221–227, 2007.
- CHALLA, Venkata Srinivas *et al.* A simulation study of mesoscale coastal circulations in mississippi gulf coast. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 91, n. 1, p. 9–25, 2009.
- CHANG, Ming *et al.* Dry deposition of reactive nitrogen to different ecosystems across eastern china: A comparison of three community models. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 720, p. 137548, 2020.
- CHAPMAN, Elaine G *et al.* Coupling aerosol-cloud-radiative processes in the wrf-chem model: Investigating the radiative impact of elevated point sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Copernicus GmbH, v. 9, n. 3, p. 945–964, 2009.
- CHATE, Dilip; BEIG, Gufran *et al.* Temporal variability of pm_{2.5} and its possible sources at the tropical megacity, bengaluru, india. *Environmental Monitoring and Assessment*, Springer, v. 194, n. 8, p. 1–18, 2022.
- CHEMEL, Charles; SOKHI, Ranjeet S. Response of london's urban heat island to a marine air intrusion in an easterly wind regime. *Boundary-layer meteorology*, Springer, v. 144, n. 1, p. 65–81, 2012.
- CHEN, Xi; LIN, Guangxing; FU, Zuntao. Long-range correlations in daily relative humidity fluctuations: A new index to characterize the climate regions over china. *Geophysical research letters*, Wiley Online Library, v. 34, n. 7, 2007.
- CHIBA, Osamu. Variability of the sea-breeze front from sodar measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer, v. 82, n. 1, p. 165–174, 1997.
- CHIN, M *et al.* Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model gocart: Model description and global properties. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 36, n. 30, p. 24671–24687, 2000.

- CHOI, Min-Woo *et al.* Comparison of pm_{2.5} chemical components over east asia simulated by the wrf-chem and wrf/cmaq models: on the models' prediction inconsistency. *Atmosphere*, MDPI, v. 10, n. 10, p. 618, 2019.
- DAFKA, Stella *et al.* On the link between the etesian winds, tropopause folds and tropospheric ozone over the eastern mediterranean during summer. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 248, p. 105161, 2021.
- DANDOU, Aggeliki; TOMBROU, Maria; SOULAKELLIS, Nikolaos. The influence of the city of athens on the evolution of the sea-breeze front. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer, v. 131, n. 1, p. 35–51, 2009.
- EMMONS, Louisa K *et al.* Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (mozart-4). *Geoscientific Model Development*, Copernicus GmbH, v. 3, n. 1, p. 43–67, 2010.
- EPA, US. Method 3050b: acid digestion of sediments, sludges, and soils. *Environ. Prot. Agency*, v. 2, p. 3–5, 1996.
- FANG, Sheng *et al.* Coupled modeling of in-and below-cloud wet deposition for atmospheric ¹³⁷cs transport following the fukushima daiichi accident using wrf-chem: A self-consistent evaluation of 25 scheme combinations. *Environment International*, Elsevier, v. 158, p. 106882, 2022.
- FAST, Jerome D *et al.* Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 111, n. D21, 2006.
- FERDIANSYAH, Muhammad Rezza; INAGAKI, Atsushi; KANDA, Manabu. Detection of sea-breeze inland penetration in the coastal-urban region using geostationary satellite images. *Urban Climate*, Elsevier, v. 31, p. 100586, 2020.
- FERREIRA, Paulo; PEREIRA, Éder. Contagion effect in cryptocurrency market. *Journal of Risk and Financial Management*, MDPI, v. 12, n. 3, p. 115, 2019.
- FERREIRA, Paulo *et al.* Detrended correlation coefficients between oil and stock markets: The effect of the 2008 crisis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 517, p. 86–96, 2019.
- GEORGIOU, George K *et al.* Evaluation of wrf-chem model (v3. 9.1. 1) real-time air quality forecasts over the eastern mediterranean. *Geoscientific Model Development*, Copernicus GmbH, v. 15, n. 10, p. 4129–4146, 2022.
- GILLIAM, Robert C; RAMAN, Sethu; NIYOGI, Dev Dutta S. Observational and numerical study on the influence of large-scale flow direction and coastline shape on sea-breeze evolution. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer, v. 111, n. 2, p. 275–300, 2004.
- GLAHN, Bob *et al.* The gridding of mos. *Weather and forecasting*, American Meteorological Society, v. 24, n. 2, p. 520–529, 2009.
- GONG, Chen *et al.* Maternal exposure to ambient pm_{2.5} and term birth weight: A systematic review and meta-analysis of effect estimates. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 807, p. 150744, 2022.

- GUENTHER, AB *et al.* The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (megan2. 1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, Copernicus GmbH, v. 5, n. 6, p. 1471–1492, 2012.
- HANNA, Steven R; PAINE, Robert J. Hybrid plume dispersion model (hpdm) development and evaluation. *Journal of Applied Meteorology*, v. 28, n. 3, p. 206–224, 1989.
- HE, Bao-Jie; DING, Lan; PRASAD, Deo. Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, v. 60, p. 102289, 2020.
- HE, Jiajian *et al.* Evaluation of planetary boundary layer schemes in wrf model for simulating sea-land breeze in shanghai, china. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 278, p. 106337, 2022.
- HEMBECK, Linda *et al.* Investigation of the community multiscale air quality (cmaq) model representation of the climate penalty factor (cpf). *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 283, p. 119157, 2022.
- HERWEHE, Jerold A *et al.* Diagnostic analysis of ozone concentrations simulated by two regional-scale air quality models. *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 45, n. 33, p. 5957–5969, 2011.
- IBARRA-ESPINOSA, Sergio *et al.* Effects of evaporative emissions control measurements on ozone concentrations in brazil. *Atmosphere*, MDPI, v. 13, n. 1, p. 82, 2022.
- IEMA, ESPÍRITO. Iema—instituto estadual de meio ambiente e recursos hídricos. *Instrução Normativa*, 2019.
- JIN, Haoyu *et al.* Influence and prediction of pm_{2.5} through multiple environmental variables in china. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 849, p. 157910, 2022.
- JORQUERA, Héctor; VILLALOBOS, Ana María. A new methodology for source apportionment of gaseous industrial emissions. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, p. 130335, 2022.
- KALA, J *et al.* Numerical simulations of the impacts of land-cover change on a southern sea breeze in south-west western australia. *Boundary-layer meteorology*, Springer, v. 135, n. 3, p. 485–503, 2010.
- KAVASSERI, Rajesh G; NAGARAJAN, Radhakrishnan. Evidence of crossover phenomena in wind-speed data. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, IEEE, v. 51, n. 11, p. 2255–2262, 2004.
- KITAGAWA, Yasmin Kaore Lago *et al.* Exposure and dose assessment of school children to air pollutants in a tropical coastal-urban area. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 803, p. 149747, 2022.
- _____. Source apportionment modelling of pm_{2.5} using cmaq-isam over a tropical coastal-urban area. *Atmospheric Pollution Research*, Elsevier, v. 12, n. 12, p. 101250, 2021.
- KOÇAK, Kasım. Examination of persistence properties of wind speed records using detrended fluctuation analysis. *Energy*, Elsevier, v. 34, n. 11, p. 1980–1985, 2009.

- KOSCIELNY-BUNDE, Eva *et al.* Indication of a universal persistence law governing atmospheric variability. *Physical Review Letters*, APS, v. 81, n. 3, p. 729, 1998.
- KRISTOUFEK, Ladislav. Measuring correlations between non-stationary series with dcca coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 402, p. 291–298, 2014.
- KURNAZ, ML. Application of detrended fluctuation analysis to monthly average of the maximum daily temperatures to resolve different climates. *Fractals*, World Scientific, v. 12, n. 04, p. 365–373, 2004.
- KWAPIEŃ, Jarosław; OŚWIECIMKA, Paweł; DROŹDŹ, Stanisław. Detrended fluctuation analysis made flexible to detect range of cross-correlated fluctuations. *Physical Review E*, APS, v. 92, n. 5, p. 052815, 2015.
- LEE, Jae-Hyeong; LEE, Sang-Hyun; KIM, Hyun Cheol. Detection of strong nox emissions from fine-scale reconstruction of the omi tropospheric no2 product. *Remote Sensing*, MDPI, v. 11, n. 16, p. 1861, 2019.
- LI, Jiali *et al.* Evaluation of the wrf-cmaq model performances on air quality in china with the impacts of the observation nudging on meteorology. *Aerosol and Air Quality Research*, Taiwan Association for Aerosol Research, v. 22, p. 220023, 2022.
- LIU, Jiaxin *et al.* Structure analysis of the sea breeze based on doppler lidar and its impact on pollutants. *Remote Sensing*, MDPI, v. 14, n. 2, p. 324, 2022.
- LYRA, Diogenes Ganghis Pimentel de. *Modelo Integrado de Gestão de Qualidade do Ar da região Metropolitana de Salvador*. Tese (Doutorado) — UNICAMP, Campinas-SãoPaulo, 2008.
- MA, Siqi *et al.* Multimodel simulations of a springtime dust storm over northeastern china: Implications of an evaluation of four commonly used air quality models (cmaq v5. 2.1, camx v6. 50, chimere v2017r4, and wrf-chem v3. 9.1). *Geoscientific Model Development*, Copernicus GmbH, v. 12, n. 11, p. 4603–4625, 2019.
- MARINHO, EBS; SOUSA, AMYR; ANDRADE, Roberto Fernandes Silva. Using detrended cross-correlation analysis in geophysical data. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 392, n. 9, p. 2195–2201, 2013.
- MATSOUKAS, Christos; ISLAM, Shafiqul; RODRIGUEZ-ITURBE, Ignacio. Detrended fluctuation analysis of rainfall and streamflow time series. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 105, n. D23, p. 29165–29172, 2000.
- MATSUI, Hitoshi *et al.* Spatial and temporal variations of aerosols around beijing in summer 2006: Model evaluation and source apportionment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 114, n. D2, 2009.
- MUPPA, Shraavan Kumar *et al.* Study on deep inland penetration of sea breeze over complex terrain in the tropics. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 104, p. 209–216, 2012.
- OSTRO, Bart *et al.* Fine particulate air pollution and mortality in nine california counties: results from calfine. *Environmental health perspectives*, National Institute of Environmental Health Sciences, v. 114, n. 1, p. 29–33, 2006.

- OTTE, TL; PLEIM, JE. The meteorology-chemistry interface processor (mcip) for the cmaq modeling system: updates through mcipv3. 4.1. *Geoscientific Model Development*, Copernicus GmbH, v. 3, n. 1, p. 243–256, 2010.
- PALMEIRA, Anderson *et al.* Long-term correlations and cross-correlations in meteorological variables and air pollution in a coastal urban region. *Sustainability*, MDPI, v. 14, n. 21, p. 14470, 2022.
- PANOFSKY, Hans A; DUTTON, John A. *Atmospheric turbulence: models and methods for engineering applications*. [S.l.], 1984.
- PECKHAM, Steven Elbert. Wrf/chem version 3.3 user's guide. 2012.
- PEDRUZZI, Rizzieri *et al.* Performance evaluation of a photochemical model using different boundary conditions over the urban and industrialized metropolitan area of vitória, brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, Springer, v. 26, n. 16, p. 16125–16144, 2019.
- PENEREIRO, Júlio César; FERREIRA, Denise Helena Lombardo. A modelagem matemática aplicada às questões ambientais: Uma abordagem didática no estudo da precipitação pluviométrica e da vazão de rios. *Millenium*, Instituto Politécnico de Viseu, n. 42, p. 27–47, 2012.
- PENG, C-K *et al.* Mosaic organization of dna nucleotides. *Physical review e*, APS, v. 49, n. 2, p. 1685, 1994.
- PODOBNIK, Boris; STANLEY, H Eugene. Detrended cross-correlation analysis: a new method for analyzing two nonstationary time series. *Physical review letters*, APS, v. 100, n. 8, p. 084102, 2008.
- QI, Haoyun *et al.* O₃ transport characteristics in eastern china in 2017 and 2021 based on complex networks and wrf-cmaq-isam. *Chemosphere*, Elsevier, p. 139258, 2023.
- REDDY, B Revanth *et al.* Impact of land surface physics in wrf on the simulation of sea breeze circulation over southeast coast of india. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Springer, v. 132, n. 6, p. 925–943, 2020.
- RYU, Young-Hee; BAIK, Jong-Jin; HAN, Ji-Young. Daytime urban breeze circulation and its interaction with convective cells. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, v. 139, n. 671, p. 401–413, 2013.
- SALVADOR, Nadir *et al.* Study of the thermal internal boundary layer in sea breeze conditions using different parameterizations: application of the wrf model in the greater vitória region. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 31, p. 593–609, 2016.
- _____. Evaluation of weather research and forecasting model parameterizations under sea-breeze conditions in a north sea coastal environment. *Journal of Meteorological Research*, Springer, v. 30, n. 6, p. 998–1018, 2016.
- SÁNCHEZ-CCOYLLO, Odón R *et al.* Evaluating the impact of vehicular aerosol emissions on particulate matter (pm_{2.5}) formation using modeling study. *Atmosphere*, MDPI, v. 13, n. 11, p. 1816, 2022.
- SANTOS, ECO *et al.* Autocorrelation of wind speed: A sliding window approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 607, p. 128213, 2022.

- SANTOS, Maíra de Oliveira; STOSIC, Tatijana; STOSIC, Borko D. Long-term correlations in hourly wind speed records in pernambuco, brazil. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 391, n. 4, p. 1546–1552, 2012.
- SEATON, Martin *et al.* A multi-model air quality system for health research: road model development and evaluation. *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, v. 155, p. 105455, 2022.
- SHEN, Chenhua. A comparison of principal components using tpeca and nonstationary principal component analysis on daily air-pollutant concentration series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 467, p. 453–464, 2017.
- SHEN, Chen-hua; LI, Chao-ling; SI, Ya-li. A detrended cross-correlation analysis of meteorological and api data in nanjing, china. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 419, p. 417–428, 2015.
- SHEN, Lixing; ZHAO, Chuanfeng; YANG, Xingchuan. Insight into the seasonal variations of the sea-land breeze in los angeles with respect to the effects of solar radiation and climate type. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 126, n. 6, p. e2020JD033197, 2021.
- SHUKLA, KK *et al.* Evaluation of extreme dust storm over the northwest indo-gangetic plain using wrf-chem model. *Natural Hazards*, Springer, v. 110, n. 3, p. 1887–1910, 2022.
- SILVA, Aleksandra Barbosa *et al.* Análise em componentes principais das condições atmosféricas em episódios de rajadas de vento na região metropolitana de salvador. Universidade Federal de Campina Grande, 2014.
- SILVA, KATTY SANTOS DA SILVA *et al.* Estimation of emissions by road vehicles in the metropolitan region of salvador, brazil. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, WIT Press, v. 252, p. 105–114, 2021.
- SKAMAROCK, William C; KLEMP, Joseph B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, Elsevier, v. 227, n. 7, p. 3465–3485, 2008.
- SKAMAROCK, William C *et al.* A description of the advanced research wrf version 3. near technical note-475+ str. Citeseer, 2008.
- SOKHI, Ranjeet S *et al.* A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions. *Environment international*, Elsevier, v. 157, p. 106818, 2021.
- SOUZA, Noéle BP; NASCIMENTO, Erick GS; MOREIRA, Davidson M. Performance evaluation of the wrf model in a tropical region: wind speed analysis at different sites. *Atmosfera*, v. 36, n. 2, p. 253–277, 2023.
- SPYROU, Christos *et al.* Development of a dust source map for wrf-chem model based on modis ndvi. *Atmosphere*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 6, p. 868, 2022.
- STULL, Roland B. *An introduction to boundary layer meteorology*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1988. v. 13.
- _____. _____. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 13.

- TALBOT, Charles *et al.* Impact of a sea breeze on the boundary-layer dynamics and the atmospheric stratification in a coastal area of the north sea. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer, v. 125, n. 1, p. 133–154, 2007.
- TOLEDO, OC *et al.* Temporal analysis of the flows of the rivers that form the hydrographic basin of moquegua (peru). *Fluctuation and Noise Letters*, World Scientific, p. 2250059, 2022.
- TOMASI, Ferdinando De; MIGLIETTA, M Marcello; PERRONE, M Rita. The growth of the planetary boundary layer at a coastal site: a case study. *Boundary-layer meteorology*, Springer, v. 139, n. 3, p. 521–541, 2011.
- TORRES-FREYERMUTH, Alec *et al.* Nearshore circulation on a sea breeze dominated beach during intense wind events. *Continental Shelf Research*, Elsevier, v. 151, p. 40–52, 2017.
- TSONIS, AA; ROEBBER, PJ; ELSNER, JB. Long-range correlations in the extratropical atmospheric circulation: Origins and implications. *Journal of Climate*, v. 12, n. 5, p. 1534–1541, 1999.
- VARQUEZ, Alvin Christopher G; NAKAYOSHI, Makoto; KANDA, Manabu. The effects of highly detailed urban roughness parameters on a sea-breeze numerical simulation. *Boundary-layer meteorology*, Springer, v. 154, n. 3, p. 449–469, 2015.
- VASSOLER, RT; ZEBENDE, GF. Dcca cross-correlation coefficient apply in time series of air temperature and air relative humidity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 391, n. 7, p. 2438–2443, 2012.
- VÉLEZ-PEREIRA, Andrés M; LINARES, Concepción De; BELMONTE, Jordina. Aerobiological modelling ii: A review of long-range transport models. *Science of The Total Environment*, Elsevier, p. 157351, 2022.
- WANG, Gang-Jin *et al.* Cross-correlations between energy and emissions markets: New evidence from fractal and multifractal analysis. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi, v. 2014, 2014.
- WANG, Yichen *et al.* Differential health and economic impacts from the covid-19 lockdown between the developed and developing countries: Perspective on air pollution. *Environmental Pollution*, Elsevier, v. 293, p. 118544, 2022.
- WHO. *The WHO STEPwise approach to surveillance*. [S.l.], 2021.
- WILCZAK, James M *et al.* Analysis of regional meteorology and surface ozone during the texaqs ii field program and an evaluation of the nmm-cmaq and wrf-chem air quality models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 114, n. D7, 2009.
- WILLIAMS, AG; HACKER, JM. Interactions between coherent eddies in the lower convective boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer, v. 64, n. 1, p. 55–74, 1993.
- WILLIAMS, M Ashok *et al.* Identification of sea breeze onset and its effect on surface black carbon aerosols over a tropical coastal environment (12.81° n, 80.03° e) in india. *Pure and Applied Geophysics*, Springer, v. 179, n. 8, p. 2993–3003, 2022.

- YE, Hancheng *et al.* Impact of calipso profile data assimilation on 3-d aerosol improvement in a size-resolved aerosol model. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 264, p. 105877, 2021.
- YOON, Ji Won; LIM, Sujeong; PARK, Seon Ki. Combinational optimization of the wrf physical parameterization schemes to improve numerical sea breeze prediction using micro-genetic algorithm. *Applied Sciences*, MDPI, v. 11, n. 23, p. 11221, 2021.
- ZEBENDE, GF; FILHO, AM da Silva. Detrended multiple cross-correlation coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 510, p. 91–97, 2018.
- ZEBENDE, GF; GUEDES, EF. Detrended correlogram method for non-stationary time-series analysis. *Fluctuation and Noise Letters*, World Scientific, v. 21, n. 02, p. 2250012, 2022.
- ZEBENDE, Gillney Figueira. Dcca cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 390, n. 4, p. 614–618, 2011.
- ZEBENDE, Gilney Figueira *et al.* Uma visão hora a hora da autocorrelação em dados de temperatura e umidade relativa do ar na bahia. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 29, 2021.
- ZHANG, Y. Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status, and outlook. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Copernicus GmbH, v. 8, n. 11, p. 2895–2932, 2008.
- ZHANG, Yang *et al.* Application of wrf/chem over east asia: Part i. model evaluation and intercomparison with mm5/cmaq. *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 124, p. 285–300, 2016.
- ZHAO, Dandan *et al.* Effects of the sea-land breeze on coastal ozone pollution in the yangtze river delta, china. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 807, p. 150306, 2022.
- ZHAO, Xiaojun; SHANG, jian; HUANG, Jingjing. Several fundamental properties of dcca cross-correlation coefficient. *Fractals*, World Scientific, v. 25, n. 02, p. 1750017, 2017.

*Simulação da poluição atmosférica em regiões urbanas costeiras utilizando o modelo
WRF-Chem*

Anderson da Silva Palmeira

Salvador, Agosto 2023.