UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

BRUNA TUÃO TRINDADE

Quantificação dos Aerossóis Atmosféricos e a Influência dos Principais Sistemas Meteorológicos Atuantes na Região da Grande Vitória/ES: Um Estudo de Caso Para o Inverno de 2013.

VITÓRIA
2013

BRUNA TUÃO TRINDADE

Quantificação dos Aerossóis Atmosféricos e a Influência dos Principais Sistemas Meteorológicos Atuantes na Região da Grande Vitória/ES: Um Estudo de Caso Para o Inverno de 2013.

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Taciana Toledo de Almeida Albuquerque
Co-orientador: Neyval Costa Reis Junior

VITÓRIA

2013

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Profª Taciana, pela orientação, ensinamentos, ajuda, paciência, por toda atenção e confiança em mim no desenvolvimento deste trabalho;

Ao meu co-orientador Prof. Neyval, por todos os ensinamentos passados em sala de aula que me auxiliaram na execução deste trabalho;

À examinadora interna Profª Jane, minha primeira professora de poluição do ar, cuja matéria me despertou o interesse pelo assunto e me trouxe até aqui;

Ao examinador externo Prof. Antônio, pela ajuda na pesquisa, por toda colaboração e atenção despendidas até aqui;

À FINEP, FAPES e CAPES pelos recursos financeiros utilizados para a aquisição dos equipamentos empregados;

Aos amigos da minha turma, que me incentivaram nos momentos mais difíceis dessa caminhada e que estiveram comigo durante todo esse tempo;

Ao meu namorado Jhonatan, meu maior incentivador durante esse trabalho, obrigada pela paciência nos meus momentos de ausência e pelo companheirismo nos momentos de diversão, e principalmente obrigada por sempre acreditar em mim;

À toda minha família, em especial aos meus pais, por todo incentivo, apoio e por me proporcionar todas as condições para que eu chegasse até aqui, e à minha irmã pela amizade de sempre;

E principalmente à Deus, o principal pilar da minha vida, a razão pela qual eu consegui chegar ao final desse curso, e quem certamente estará comigo em todos os momentos da minha vida.

RESUMO

O material particulado fino, ou seja, com diâmetro menor que 2,5 µm ($MP_{2,5}$), tem grande influência da vida humana em diversos aspectos, principalmente na saúde, pois tem a capacidade de penetrar profundamente no trato respiratório e causar doenças como asma, bronquite, podendo causar irritação nos olhos e na garganta e transportar para a corrente sanguínea substâncias tóxicas e cancerígenas. Essa situação é agravada em períodos críticos de dispersão de poluentes, como no inverno, quando há altas pressões estacionárias sobre o continente que inibem a dispersão vertical, reduzem a velocidade do vento e aumentam as horas de calmaria, provocando aumento na concentração de poluentes. Em vista disso, este estudo teve como objetivo avaliar os níveis de concentração de material particulado fino na Região da Grande Vitória (RGV) no período do inverno de 2013, e verificar a influência dos fenômenos meteorológicos de grande escala na concentração deste poluente. Para isso, foi realizada uma campanha experimental entre os dias 21 de junho e 21 de setembro de 2013 (3 meses), período do inverno no hemisfério sul, onde coletou-se o $MP_{2,5}$ por 24h em dias alternados em 6 pontos da RGV, utilizando 6 amostradores Minivol com filtros de teflon, os quais foram submetidos a análise gravimétrica para obtenção da massa de $MP_{2,5}$. Também foi utilizado o equipamento LAS para contagem de partículas entre os dias 7 de agosto e 2 de setembro. Os resultados das análises gravimétricas indicaram que as concentrações de $MP_{2,5}$ médias do período completo variaram entre 9,70 µg/m³ e 14,36 µg/m³ nas 6 localidades amostradas. A máxima média de 24h foi registrada na localidade de Jardim Camburi (29,35 µg/m³) e a mínima na localidade do Ibes (3,13 µg/m³). A concentração limite de $MP_{2,5}$ indicada como diretriz para padrões de qualidade do ar pela OMS, referente à média de 24 horas, foi ultrapassada duas vezes, uma vez em Jardim Camburi e outra em Cariacica. A distribuição de tamanho das partículas indicou maior número de partículas no horário de 18h às 21h, que caracteriza o perfil da fonte de emissão das partículas finas da região como sendo, provavelmente, emissão veicular por queima de combustíveis. Durante todo o período amostrado, as condições meteorológicas foram analisadas, e verificou-se que eventos de frentes frias, que acarretam em aumento da velocidade do vento e possíveis precipitações, causaram diminuição na concentração do material particulado fino e grosso em massa e número; em contrapartida, a incidência de anticiclones na região, que causam diminuição na velocidade do vento e tempo estável, geraram concentrações maiores de material particulado. Assim, pôde-se perceber que no inverno, as frentes frias têm importante papel na dispersão, pois aumentam a velocidade do vento, aumentando o transporte, e ainda podem causar chuvas, que lavam a atmosfera, reduzindo a concentração dos poluentes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diâmetro aerodinâmico, referente a uma partícula de forma qualquer. Fonte: Ruzer e Harley, 2004. 14
Figura 2. Distribuição de tamanho por número de partículas. Dados de experimento realizado dia 24 de julho de 2012, em Vitória-ES. 15
Figura 3. Esquema da distribuição de tamanho do aerossol atmosférico. A linha sólida representa a hipótese original de Whitby e colaboradores, com três modas. A quarta moda (das partículas ultra-finas), bem como os dois picos por vezes observado na moda de acumulação, são mostrados pelas linhas pontilhadas. (Fonte: YNOUE e ANDRADE, 2004 adaptado de FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000, *apud* PEREIRA, 2009). 16
Figura 4. Representação simbólica das frentes. 1: frente fria; 2: frente quente; 3: frente oclusa; 4: frente estacionária (LLOPART, 2012). 24
Figura 5. Modelo de uma superfície frontal fria, com o conjunto típico de nuvens associadas. Ac: altocumulus; Cb: cumulonimbus; Ci: cirrus; Sc: stratocumulus; Cu: cumulus (VAREJÃO-SILVA, 2006). 24
Figura 6. Modelo de uma superfície frontal quente, com o conjunto típico de nuvens associadas. Ns: nimbostratus; Cs: cirrostratus (VAREJÃO-SILVA, 2006). 25
Figura 7. Sequência temporal esquemática da oclusão do tipo frio (esquerda) e do tipo quente (direita) (VAREJÃO-SILVA, 2006). 26
Figura 8. Esquema ilustrativo de uma ZCAS e a marca usualmente adotada para indicá-la em uma carta sinótica (em vermelho) (LLOPART, 2012). 27
Figura 9. Posicionamento da ASAS no período de verão (esquerda), com centro sobre o oceano, e no inverno (direita), quando seu centro desloca-se mais para o norte e oeste, atingindo a costa do Brasil. (CAVALCANTI *et al*, 2009). 29
Figura 10. Região da Grande Vitória e seus municípios. (IEMA, 2011) 30
Figura 11. Localização das fontes emissoras de origem industrial na RGV. (Fonte: IEMA, 2011). 31
Figura 12. Gráfico da temperatura média para o município de Vitória para o período de 1961 a 1990. 35
Figura 13. Gráfico da precipitação para o município de Vitória para o período de 1961 a 1990. 35
Figura 14. Distribuição das taxas de emissão de $MP_{2,5}$ na RGV (IEMA, 2011). 37
Figura 15. Estações de monitoramento da RAMQAR na RGV. 38
Figura 16. Locais amostrados com o MiniVol (em vermelho) e pelo LAS (em amarelo). Fonte: Google Earth. 40
Figura 17. Equipamento MiniVol, da AIRMETRICS. 41
Figura 18. Esquema do mecanismo de impactação inercial. 42
Figura 19. Configuração do amostrador para coleta de MP_{10}. 43
Figura 20. Configuração do amostrador para coleta de $MP_{2,5}$. 43
Figura 21. Filtro de teflon da Whatman utilizado nas amostragens. (a) Embalagem dos filtros. (b) Filtro de teflon. 45
Figura 22. Capela utilizada para as pesagens e manuseamento dos filtros. 46

Figura 23. Balança analítica utilizada para a pesagem dos filtros. 46
Figura 24. Laser Aerossol Spectrometer (LAS), fabricado pela GRIMM AEROSOL. (a) Casa de proteção de intempéries. (b) Foto superior: por dentro da casa de proteção; foto inferior: o aparelho LAS. 49
Figura 25. Temperatura, umidade relativa (horárias) e precipitação acumulada (diária) do mês de junho de 2013. 53
Figura 26. Temperatura, umidade relativa (horárias) e precipitação acumulada (diária) do mês de julho de 2013. 53
Figura 27. Temperatura, umidade relativa (horárias) e precipitação (diária) do mês de agosto. 54
Figura 28. Temperatura, umidade relativa (horárias) e precipitação acumulada (diária) do mês de setembro. 54
Figura 29. Rosas dos ventos de junho (a), julho (b), agosto (c), setembro (d) e do período completo (e). 56
Figura 30. Distribuição de frequência dos ventos de acordo com a velocidade para o período completo. 57
Figura 31. Temperatura média e precipitação do período, com as letras FF indicando as incidências de frente frias. 58
Figura 32. Velocidade do vento média diária do período estudado, com setas indicando a incidência de frentes frias. 59
Figura 33. Representação da direção média diária do vento de 6 das 7 frentes frias (FF) que incidiram sobre a região, com setas apontando para onde o vento predominantemente soprou no dia. Os dias representados são os dias anteriores e posteriores às frentes frias. Obs.: a FF do dia 25 de setembro não foi representada pois este dia não faz parte do período de monitoramento de material particulado deste estudo. 60
Figura 34. Carta sinótica do dia 31 de julho. Nota-se a presença de um anticiclone atuando sobre o ES (indicado pelo contorno amarelo e um A azul) (Fonte: CPTEC). 61
Figura 35. Chaminés de uma churrascaria ao lado do local de amostragem em Jardim Camburi. O local de amostragem está indicado com um círculo vermelho. 63
Figura 36. Concentrações máximas encontradas em cada localidade e a linha de indicação do limite recomendado pela OMS para $MP_{2,5}$ (25 µg/m³), além dos dias em que ocorreram essas concentrações. 64
Figura 37. Variação da concentração de $MP_{2,5}$ durante o período amostrado para as localidades: Laranjeiras, Jardim Camburi e Enseada do Suá. 67
Figura 38. Variação da concentração de $MP_{2,5}$ durante o período amostrado para as localidades: Vitória Centro, Ibes e Cariacica. 67
Figura 39. Variação das concentrações e da precipitação para o período amostrado, para as localidades de Laranjeiras, Jardim Camburi e Enseada do Suá. 68
Figura 40. Variação das concentrações e da precipitação para o período amostrado, para as localidades de Vitória – Centro, Ibes e Cariacica. 69

Figura 41. Concentração e velocidade do vento de todo o período amostrado para as localidades de Laranjeiras (a), Jardim Camburi (b) e Enseada do Suá (c). 70
Figura 42. Concentração e velocidade do vento de todo o período amostrado para as localidades de Enseada do Suá (a), Vitória – Centro (b) e Cariacica (c). 71
Figura 43. Distribuição de tamanho em número em função do diâmetro para as partículas da moda fina (d_a <2,5 µm), com médias a cada 3 horas. 73
Figura 44. Distribuição de tamanho em número em função do diâmetro para as partículas da moda grossa (d_a >2,5 µm), com médias a cada 3 horas. 74
Figura 45. Número total de partículas por hora, para todo o período amostrado. .. 75
Figura 46. Número total de partículas por hora e precipitação diária, para todo o período amostrado. 76
Figura 47. Número de partículas e velocidade do vento para o período de 07/08 a 15/08. 76
Figura 48. Número de partículas e velocidade do vento para o período de 16/08 a 24/08. 76
Figura 49. Número de partículas e velocidade do vento para o período de 25/08 a 02/09. 77
Figura 50. Distribuição de tamanho em número em função do diâmetro com média a cada 3 horas para os dias de semana amostrados. 78
Figura 51. Distribuição de tamanho em número em função do diâmetro com média a cada 3 horas para os dias de final de semana amostrados. 78
Figura 52. Distribuição do número partículas por litro a cada hora, considerando as modas das partículas finas e grossas. 79

SUMÁRIO

1. Introdução 8
2. Objetivos 11
2.1. Objetivo geral 11
2.2. Objetivos específicos 11
3. Revisão Bibliográfica 12
3.1. Material particulado atmosférico 12
3.1.1. Distribuição de tamanho das partículas 14
3.1.2. Composição química do material particulado 17
3.1.3. Efeitos sobre a saúde 18
3.1.4. Legislação aplicável ao material particulado 20
3.2. Sistemas sinóticos influentes na dispersão atmosférica na região de estudo 22
3.2.1.1. Sistemas frontais 23
3.2.1.2. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) 27
3.2.1.3. Alta Subtropical do Atlântico Sul 28
4. Região de estudo 30
4.1. Clima e relevo 32
4.2. Qualidade do ar na RGV 36
5. Metodologia 39
5.1. Locais e período de amostragem 39
5.2. Equipamentos e procedimentos de amostragem do aerossol 41
5.2.1. MiniVol 41
5.2.2. LAS 48
5.3. Dados meteorológicos 49
6. Resultados e discussão 51
6.1. Condições meteorológicas do período 51
6.2. Análise gravimétrica do $MP_{2,5}$ 61
6.3. Distribuição de tamanho em número 72
7. Conclusões e Recomendações 80
8. Bibliografia 83
9. Apêndice 89

1. Introdução

Uma das consequências advindas do fenômeno do crescimento populacional nas grandes cidades e do aumento das atividades humanas é a poluição. No Brasil, a Política Nacional do Meio Ambiente, por meio da lei nº 6.938/81, define poluição como “a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos” (BRASIL, 1981).

Assim, a poluição do ar é usualmente definida como uma situação atmosférica em que estão presentes substâncias com concentrações maiores que o ambiente natural, em níveis que produzam efeitos nocivos significativos em seres humanos, animais, vegetação ou materiais (SEINFELD, 1986). Um poluente atmosférico pode então ser definido como qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa e de energia que, presente na atmosfera, pode torna-la poluída.

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados de acordo com seu estado físico (material particulado, gases e vapores), origem (poluentes primários ou secundários) e de acordo com a sua classe química (orgânicos ou inorgânicos). Este trabalho tem por objetivo estudar as concentrações de material particulado (MP) presentes na atmosfera da Região da Grande Vitória (RGV) e avaliar sua relação com as condições meteorológicas predominantes na região durante o período de inverno.

Material particulado atmosférico, ou aerossol, são as partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera que variam de alguns nanômetros a dezenas de micrômetros, que podem ser originárias de fontes naturais, como por exemplo, a ressuspensão de poeira do solo que sofre ação do vento, ou de atividades antropogênicas, como a queima de combustíveis fósseis (SEINFELD e PANDIS, 2006). Partículas com diâmetro aerodinâmico (d_a) menor que 2,5 µm são consideradas partículas finas ($MP_{2,5}$) e as partículas com d_a que variam entre 2,5 e

10 µm constituem o material particulado grosso. As partículas inaláveis (MP_{10}) são constituídas pela fração de partículas que possuem d_a menor ou igual a 10 µm (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Partículas em suspensão na atmosfera, especialmente as finas, estão associadas com problemas de saúde, pois podem penetrar no trato respiratório e se depositar na região pulmonar, podendo causar diversas doenças respiratórias, cardiovasculares, dentre outras (HOLGATE *et al*., 1999). De uma forma geral, a presença do MP na atmosfera pode causar danos à saúde da população, de animais, além de causar injúrias em vegetais, afetar o clima em escala regional e global, causar potencial incômodo por sua deposição em materiais e edificações, além da redução na visibilidade com a formação de fumaça e névoa (COLLS, 2002; JACOBSON, 2002).

É importante salientar que a poluição do ar não é um problema relacionado apenas às fontes de emissão de poluentes, mas também a condições e fenômenos atmosféricos, pois é na camada mais baixa da atmosfera, a troposfera, onde ocorrem a emissão e os principais processos de transporte, difusão, transformação química e remoção dos poluentes (ARYA, 1999). As emissões de poluentes, associadas às características topográficas e meteorológicas, determinam os níveis de qualidade do ar de uma determinada região. Deve-se ressaltar que, mesmo mantendo a emissão dos poluentes constante, a qualidade do ar pode piorar ou melhorar, dependendo das condições meteorológicas estarem desfavoráveis ou favoráveis à dispersão dos poluentes.

Logo, as condições atmosféricas tem um papel determinante na descrição físico-química do transporte de poluentes entre a fonte e o receptor. Portanto, as análises dos dados meteorológicos, a definição dos períodos críticos, o monitoramento dos poluentes e a modelagem matemática para simulação da qualidade do ar são as ferramentas principais para o planejamento de novas atividades industriais e para o estabelecimento de planos de controle de poluição do ar (LISBOA, 2007).

Considerando a influência dos poluentes atmosféricos, em especial do material particulado, na saúde humana e a influência dos sistemas meteorológicos na

formação e transporte do mesmo, além da ausência de pesquisas que relacionem a concentração de material particulado fino e os eventos sinóticos na Região da Grande Vitória (RGV), esta pesquisa visa contribuir para o conhecimento das características do material particulado da região, por meio de sua quantificação e distribuição de tamanho, além de observar a influência dos principais sistemas meteorológicos de escala sinótica atuantes na região durante o período crítico de inverno, na variabilidade das concentrações dos aerossóis.

Vale ressaltar que ainda não existe uma legislação nacional com relação ao $MP_{2,5}$, fato este que faz com que a maioria dos estados brasileiros não monitorem este poluente. Logo, a ausência deste monitoramento faz com que toda a população da região fique suscetível a presença destas partículas finas na atmosfera podendo afetar a saúde pública, a visibilidade e o clima da região. Estes fatores aumentam a importância do presente trabalho, pois ele irá permitir conhecer os níveis de $MP_{2,5}$ na região, podendo auxiliar o órgão ambiental nas tomadas de decisão com relação a redução das emissões deste poluente e de seus precursores.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Quantificação e avaliação dos níveis de concentração do material particulado fino ($MP_{2,5}$) na Região da Grande Vitória (RGV) durante o inverno de 2013.

2.2. Objetivos específicos

O estudo de caso constituiu-se em uma campanha de amostragem em seis estações de qualidade do ar da RGV, no período de inverno de 2013. Nesse estudo buscou-se:

- Quantificar gravimetricamente os níveis de $MP_{2,5}$ na RGV;
- Avaliar a distribuição de tamanho das partículas finas coletadas na região;
- Identificar e descrever os sistemas sinóticos predominantes na RGV durante o período de estudo;
- Avaliar a influência dos principais sistemas meteorológicos atuantes na RGV com os níveis de concentração do $MP_{2,5}$.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Material particulado atmosférico

Material particulado atmosférico são partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, cujo tamanho varia entre aproximadamente 0,002 e 100 µm. Podem existir na atmosfera partículas maiores que 100 µm, porém estas rapidamente se depositam em alguma superfície, não permanecendo em suspensão por significantes períodos de tempo (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000).

O material particulado pode ser emitido diretamente na atmosfera como partículas, consideradas partículas primárias, ou formado na atmosfera por processos de conversão gás-partícula, gerando as chamadas partículas secundárias (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Uma vez na atmosfera, as partículas podem mudar de tamanho e composição, por meio da condensação de vapores ou pela evaporação, pela coagulação com outras partículas ou por reação química. Além disso, uma fração específica das partículas em suspensão no ar age como núcleos de condensação de nuvens, na formação da precipitação. O vapor d'água supersaturado presente na atmosfera necessita de uma superfície sobre a qual ele possa condensar, assim, essa fração de partículas adsorvem as gotículas de nuvem até estas atingirem um tamanho crítico da ordem de micrômetros e caírem em forma de gotas de chuva (SEINFELD e PANDIS, 2006).

As partículas são eventualmente removidas da atmosfera por meio de dois mecanismos: deposição seca, que é a deposição das partículas na superfície da terra ou de materiais, ou pela deposição úmida, que envolve o processo chamado de *rainout* (incorporação de partículas na formação da chuva, em processos que ocorrem dentro da nuvem) e outro chamado de *whashout* (incorporação de partículas em gotas de chuva, processo conhecido como lavagem atmosférica) (MIRANDA, 2001). Devido a esses mecanismos de deposição, as partículas possuem um tempo de residência na troposfera relativamente curto, que variam de poucos dias a poucas semanas (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Com relação a sua origem, os aerossóis podem ser originados por fontes naturais ou antropogênicas. Significantes fontes naturais de partículas na atmosfera incluem detritos de solo e rocha, sedimentos de ação vulcânica, spray marinho, queima de biomassa e reações entre emissões gasosas naturais. Emissões de material particulado atribuíveis a atividades humanas se originam principalmente a partir de queima de combustíveis, processos industriais, fontes fugitivas não industriais (como poeira de estradas pavimentadas e não pavimentadas, construções, etc.) e veículos automotores (SEINFELD e PANDIS, 2006).

A Tabela 1 apresenta algumas fontes naturais e antropogênicas primárias e secundárias para $MP_{2,5}$ e MP_{10}.

Tabela 1. Fontes naturais e antropogênicas de material particulado.
Fonte: CEPA, 1999.

	Fontes naturais		Fontes antropogênicas	
	Primárias	**Secundárias**	**Primárias**	**Secundárias**
$MP_{2,5}$	Queimadas (carbono elementar e carbono orgânico)	Carbono orgânico a partir de compostos orgânicos voláteis (COV)	Combustão de combustíveis fósseis (carbono elementar e carbono orgânico)	Carbono orgânico a partir de fontes antropogênicas de COV (automóveis, processos industriais)
		Nitrato a partir de óxido de nitrogênio (NO_x) natural	Combustão de madeira em residências (carbono elementar e carbono orgânico)	Sulfatos e nitratos a partir de fontes antropogênicas de óxido de enxofre (SO_x) e NO_x (automóveis, termelétricas, etc)
MP_{10}	Poeira carregada pelo vento		Poeira mineral de indústrias de mineração e de extração	
	Spray de sal marinho		Poeira de rodovias e construções	
	Pólen, esporos			

3.1.1. Distribuição de tamanho das partículas

A atmosfera, seja em áreas urbanas ou remotas, contém significante concentração de partículas em suspensão, chegando a faixas de 10^7 a 10^8 partículas por cm^3. Os diâmetros dessas partículas abrangem mais de quatro ordens de grandeza, indo de poucos nanômetros a cerca de 100 µm. O tamanho dessas partículas influencia tanto seu tempo de vida na atmosfera quanto suas propriedades físicas e químicas (SEINFELD e PANDIS, 2006). Portanto, além da concentração, uma importante forma de caracterização das partículas atmosféricas é o tamanho, que está relacionado não apenas à sua fonte, mas também a seus efeitos na saúde, visibilidade e clima (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000).

O tamanho das partículas é, em geral, expresso em relação ao seu tamanho aerodinâmico, definido como o diâmetro de uma esfera que possui densidade unitária e com a mesma velocidade de sedimentação que a partícula em questão (HINDS, 1982). A Figura 1 mostra um exemplo da equivalência do diâmetro aerodinâmico para uma partícula de forma qualquer.

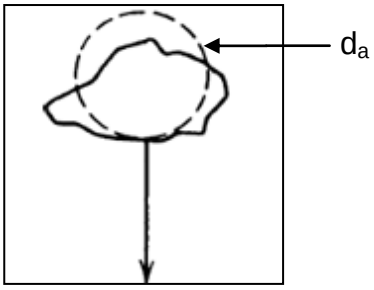


Figura 1. Diâmetro aerodinâmico, referente a uma partícula de forma qualquer.
Fonte: Ruzer e Harley, 2004.

Uma forma de expressar a quantidade e as características em relação ao tamanho do material particulado presente em certo volume de ar é através da distribuição de tamanho das partículas. Essa distribuição pode ser explicada como uma variação da concentração (em número, área superficial, volume ou massa de partículas por unidade de volume de ar) com o tamanho das partículas (WARNECK, 2000). Desta forma, é possível determinar a frequência das partículas de acordo com seu diâmetro. Por exemplo, a Figura 2 mostra a distribuição de tamanho das partículas com relação ao seu número, a partir de dados obtidos em uma campanha

experimental realizada em Julho/2012 em Vitória-ES. É possível observar que a maioria das partículas coletadas, em número, possui diâmetro menor que 2,5 µm.

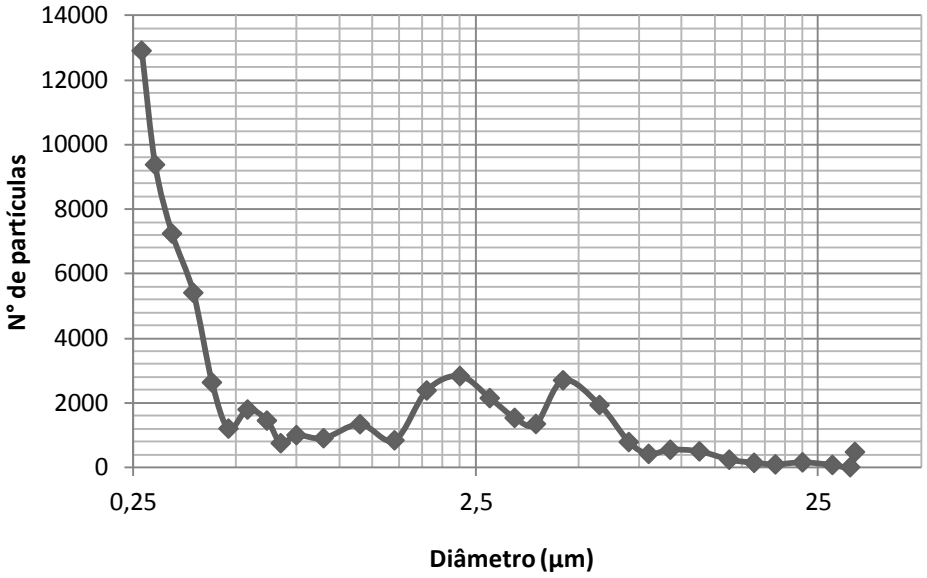


Figura 2. Distribuição de tamanho por número de partículas. Dados de experimento realizado dia 24 de julho de 2012, em Vitória-ES.

Seinfeld e Pandis (2006) caracterizam o material particulado em dois grupos: o material particulado fino, que possui diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm, e o material particulado grosso, com diâmetro aerodinâmico maior que 2,5 µm. As partículas grossas e finas, em geral, originam-se separadamente, são removidas da atmosfera por diferentes mecanismos, necessitam de diferentes técnicas de remoção nas fontes, têm diferentes composições químicas e propriedades ópticas e também diferem significativamente nos padrões de deposição no trato respiratório.

As partículas são usualmente divididas em modas, baseadas nas distribuições de tamanho das partículas na atmosfera e seus mecanismos de formação. A Figura 3 apresenta a distribuição típica em modas do aerossol atmosférico.

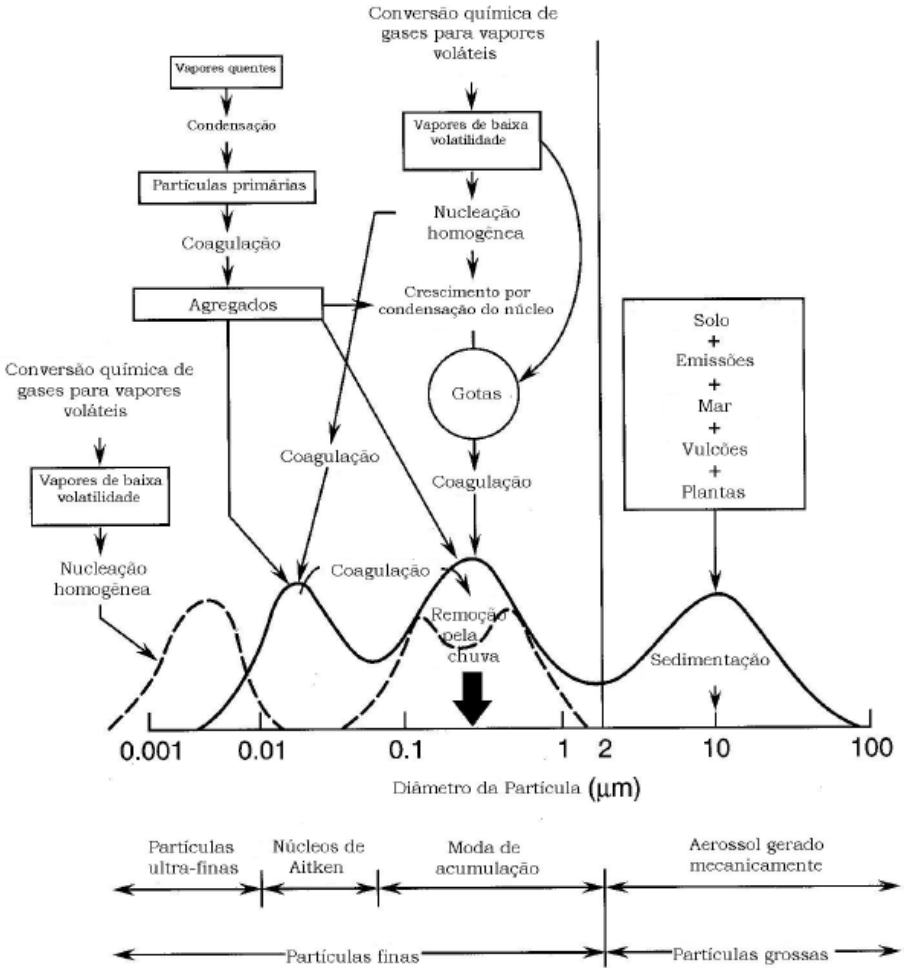


Figura 3. Esquema da distribuição de tamanho do aerossol atmosférico. A linha sólida representa a hipótese original de Whitby e colaboradores, com três modas. A quarta moda (das partículas ultra-finas), bem como os dois picos por vezes observado na moda de acumulação, são mostrados pelas linhas pontilhadas.
(Fonte: YNOUE e ANDRADE, 2004 adaptado de FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000, *apud* PEREIRA, 2009).

A moda nucleação compreende partículas com diâmetro de até 10nm, compreendendo as partículas ultrafinas. A moda dos núcleos de Aitken compreende a faixa de diâmetros que varia de 10 nm a 100 nm. Nestas duas modas existe uma grande contribuição de partículas em número, mas por causa do seu tamanho reduzido, essas partículas representam uma porcentagem muito pequena da massa total das partículas atmosféricas, apesar de serem as mais numerosas.

Partículas da moda nucleação são formadas a partir da condensação de vapor quente durante processos de combustão e a partir da nucleação de espécies

químicas que formam novas partículas. Elas são removidas da atmosfera principalmente pela coagulação com partículas maiores. As partículas da moda dos núcleos de Aitken têm curto tempo de residência devido à sua alta reatividade química e física, sendo os componentes desta moda incorporados em partículas da moda acumulação.

A moda de acumulação, composta por partículas com diâmetro entre 0,1 µm e 2,5 µm, usualmente compõe uma parte substancial da massa do aerossol. As partículas dessa moda são originadas pela coagulação de partículas da moda nucleação e pela condensação dos vapores em partículas pré-existentes, causando o crescimento desta faixa de tamanho. A remoção dessas partículas da atmosfera usualmente se dá pela deposição úmida, pelos processos de *rainout* e *washout,* já explicados anteriormente.

Os mecanismos de remoção da faixa de acumulação são menos eficientes que os das outras modas, fazendo com que as partículas da moda acumulação tenham um tempo de residência maior do que as partículas da moda nucleação e grossa, e por isso há um maior número dessas partículas na atmosfera (SEINFELD e PANDIS, 2006).

As partículas grossas, cujos diâmetros são maiores que 2,5 µm, são geralmente formadas por processos mecânicos naturais e antropogênicos. Devido ao seu tamanho, essas partículas geralmente têm grandes velocidades de sedimentação e, por isso, permanecem por um período relativamente curto na atmosfera (SEINFELD e PANDIS, 2006).

3.1.2. Composição química do material particulado

O material particulado atmosférico contém centenas de espécies químicas diferentes devido à diversidade de fontes de partículas primárias emitidas para a atmosfera e também devido aos processos de transformação química que ocorrem

na atmosfera formando as partículas secundárias (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000).

A identificação da composição química do MP tem como objetivos a identificação das fontes do MP, o entendimento das transformações químicas na atmosfera, e o provimento de subsídios para melhor compreensão dos efeitos adversos do MP à saúde humana e para as ações de controle ambiental (SOUZA *et al*., 2010).

As partículas grossas presentes no material particulado atmosférico são geralmente constituídas por partículas primárias, produzidas a partir de processos mecânicos, como ressuspensão de poeira de solo por ventos, erosão, sal marinho, cinzas de combustão e emissões biogênicas naturais. Estas partículas são geralmente compostas de sódio, cloro, silício, magnésio, alumínio, ferro e metais traço, além das partículas orgânicas (como pólen ou fragmentos de plantas), frações carbonáceas que englobam tanto o carbono elementar como o orgânico, elementos da crosta e água. As partículas finas são geralmente emitidas por processos de combustão, indústrias e veículos, e são compostas predominantemente de íons sulfatos, nitratos e amoníacos, material carbonáceo (carbono orgânico e elementar), e metais (SEINFELD e PANDIS, 2006).

3.1.3. Efeitos sobre a saúde

O material particulado é o poluente atmosférico mais consistentemente associado a efeitos adversos à saúde humana (WHO, 2006). Estudos recentes mostram que os efeitos adversos da poluição do ar, principalmente em relação ao material particulado, acontecem mesmo para baixas concentrações dos poluentes.

O tamanho das partículas está diretamente relacionado ao seu potencial para causar problemas à saúde. Partículas com diâmetro maior que 10 µm, ao entrarem no trato respiratório, geralmente ficam retidas no nariz ou se depositam na região da traqueia, sendo removidas pelos próprios mecanismos de defesa das vias superiores, como a tosse, os cílios e a fagocitose. As partículas com diâmetro

menor que 10 µm são as que inspiram maior preocupação, pois podem afetar os pulmões e o coração, ao atingir a corrente sanguínea, e causar graves efeitos à saúde (USEPA, 2012).

As partículas menores que 2,5 µm de diâmetro ($MP_{2,5}$), denominadas partículas finas, causam sérios danos à saúde de humanos e animais, pois elas entram no sistema respiratório e alcançam a região dos alvéolos, onde ocorre a troca de gases. Nessa região, o tempo de eliminação das partículas depositadas é muito maior que no trato respiratório superior, portanto, o potencial de efeitos danosos para a saúde é muito maior (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000).

Em relação ao sistema circulatório, as partículas respiráveis têm a capacidade de penetrar nos vasos sanguíneos através dos alvéolos e causar danos agudos ao sistema como um todo, levando a alterações no ritmo cardíaco, isquemia miocárdica e, alterações na coagulação sanguínea. Além disso, podem transportar para o interior do sistema respiratório, e consequentemente para a corrente sanguínea, substâncias tóxicas e cancerígenas (FERNANDES *et al*., 2010).

O material particulado respirável também pode causar irritação nos olhos e na garganta, reduzindo a resistência às infecções e ainda provocando doenças crônicas, como asma e bronquite (FERNANDES *et al*., 2010).

Segundo a OMS, os efeitos e sintomas provocados pelo MP, em curto prazo são: reações inflamatórias no pulmão, insuficiência respiratória, efeitos adversos no sistema cardiovascular, aumento do uso de medicamentos, aumento de internações hospitalares, mortalidade. Em longos períodos de exposição, os sintomas e efeitos são: diminuição da capacidade de respiração, redução da função pulmonar das crianças, obstrução pulmonar crônica, redução da expectativa de vida, mortalidades por doenças cardiovasculares e respiratórias e desenvolvimento de câncer nos pulmões (WHO, 2006).

Esses efeitos, entretanto, estão relacionados à suscetibilidade do agente receptor, sendo principalmente afetada a parcela da população mais frágil, como idosos, crianças e pessoas que já apresentam doenças respiratórias (WHO, 2006)

A Organização Mundial de Saúde recomenda a utilização da concentração do $MP_{2,5}$ como marcador para estimar o risco de exposição ambiental para material particulado (WHO, 2006), justificando a importância de quantificar e caracterizar este poluente nas regiões urbanas onde ainda não há monitoramento.

3.1.4. Legislação aplicável ao material particulado

Com o objetivo de garantir a proteção da saúde e do bem-estar das pessoas, padrões de qualidade do ar são estipulados em diversos países. Esses padrões, segundo a Resolução CONAMA nº 03/90, são as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 03 de 1990 define os padrões de qualidade do ar apenas para sete poluentes, três dentre eles relacionados ao material particulado: fumaça, MP_{10} (partículas com diâmetro menor que 10 µm) e PTS (partículas totais em suspensão). A referida Resolução divide os padrões de qualidade em padrões primários e secundários. Os padrões primários são referentes aos efeitos na saúde da população humana e, se ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Já os padrões secundários são referentes aos mínimos efeitos adversos sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Assim, os padrões secundários tendem a ser mais restritivos que os primários.

Considerando a faixa de MP relacionada a este estudo, ou seja, com diâmetro menor que 10 µm, a legislação brasileira define limites apenas para o MP_{10}, não havendo padrões nacionais para o $MP_{2,5}$. A Resolução CONAMA nº 03/90 define limite para MP_{10} de 150 µg/m³ para média de 24h e 50 µg/m³ para a média anual, não havendo diferença entre o padrão primário e secundário.

A legislação brasileira encontra-se defasada em relação a outros países, por não apresentar um padrão para o $MP_{2,5}$, considerando os efeitos adversos de sua concentração no ar para a saúde humana e a importância de seu monitoramento. Porém, em 2008, o Estado de São Paulo iniciou um processo de revisão dos padrões de qualidade do ar estaduais, baseando-se nas diretrizes estabelecidas pela OMS, com participação de representantes de diversos setores da sociedade. Este processo culminou na publicação do Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013, estabelecendo novos padrões de qualidade do ar por intermédio de um conjunto de metas gradativas e progressivas para que a poluição atmosférica seja reduzida a níveis desejáveis ao longo do tempo (CETESB, 2013). Atualmente, está em vigor no estado de São Paulo a meta intermediária I, que para material particulado fino ($MP_{2,5}$) estabelece um limite de 60 µg/m³ para média de 24h e 20 µg/m³ para média anual.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda o padrão de qualidade do ar para $MP_{2,5}$ com base nos efeitos à saúde conhecidos, tanto para curto quanto para longo prazo, definindo um padrão de 25 µg/m³ para média de 24h e de 10 µg/m³ para média anual (WHO, 2006). Além disso, muitos países têm inserido o parâmetro $MP_{2,5}$ como padrão de qualidade do ar em suas legislações ambientais, tais como Estados Unidos, países da União Europeia, Canadá, México, dentre outros (LEE, 2010). A Tabela 2 apresenta os padrões de qualidade do ar para o $MP_{2,5}$ adotados por alguns países e em São Paulo, além das diretrizes da OMS.

Tabela 2. Padrões de qualidade do ar para $MP_{2,5}$ em µg/m³ adotado pelos países da União Européia, Canadá, Estados Unidos, México, por São Paulo e pela OMS.

Local	Média	Padrão (µg/m³)	Referência
São Paulo	24h	60	CETESB (2013)
	Anual	20	
Canadá	24h	30	Lee (2010)
União Européia	Anual	25 (a partir de 2010)	Directive
	Anual	20 (a partir de 2015)	2008/50/CE (2008)
Estados Unidos	24h	35	USEPA (2006)
	Anual	15	
México	24h	65	Lee (2010)

	Anual	15	
OMS	24h	25	WHO (2006)
	Anual	10	

3.2. Sistemas sinóticos influentes na dispersão atmosférica na região de estudo

Um dos principais fatores e que precisa ser levado em consideração quando se trata de uma situação de poluição atmosférica, é a influência das condições meteorológicas na dispersão dos poluentes. Devido a essa influência, alguns poluentes, depois de emitidos, são transportados à longa distância ou permanecem concentrados em um determinado local. Ou seja, as condições atmosféricas são muito importantes para a determinação da concentração de poluentes em uma região, pois podem tanto auxiliar na dispersão quanto retardá-la.

Os mecanismos atmosféricos que influenciam a dispersão de poluentes podem ser de diferentes escalas espaciais: micro, meso ou macroescala, esta última também conhecida como escala sinótica, cuja área de influência é de várias centenas de quilômetros.

Os sistemas sinóticos têm grande influência nos movimentos da atmosfera e, consequentemente, na dispersão de poluentes, principalmente no inverno, quando a baixa insolação limita o desenvolvimento da camada limite planetária, reduzindo a circulação do ar causada pela turbulência térmica, fazendo com que os sistemas de circulação sinótica assumam um papel importante na circulação atmosférica desse período.

Os efeitos da escala sinótica sobre a poluição do ar podem resultar em condições favoráveis à dispersão, no acontecimento de eventos de baixas pressões e frentes; ou condições desfavoráveis à dispersão, em eventos de altas pressões estacionárias no inverno e as inversões térmicas que inibem a dispersão vertical, reduzindo a velocidade do vento e aumentando as horas de calmaria (LISBOA, 2007).

Abaixo serão apresentados sumariamente os principais sistemas meteorológicos de escala sinótica observados com maior frequência na área de estudo, que influenciam na dispersão do material particulado na atmosfera.

3.2.1.1. Sistemas frontais

Primeiramente, é importante introduzir o conceito de massas de ar. Massa de ar é uma grande porção da atmosfera que cobre milhares de quilômetros da superfície terrestre e que apresenta uma distribuição vertical aproximadamente uniforme de temperatura e umidade. Uma massa de ar se forma quando uma considerável porção da atmosfera estabelece um prolongado contato com uma vasta região, cuja superfície possui características aproximadamente homogêneas (oceanos, grandes florestas, desertos, etc.) (VAREJÃO-SILVA, 2006). Sob o ponto de vista termodinâmico, as massas de ar são geralmente classificadas quanto à temperatura e à umidade. Em relação à temperatura, as massas de ar dividem-se em quentes e frias, conceito que é relativo e exige comparação com a temperatura da superfície sobre a qual ela se desloca ou da massa de ar vizinha. No que se refere à umidade, as massas são classificadas em secas e úmidas, conceito baseado na diferença da temperatura do ar com a temperatura do ponto de orvalho que o ar apresenta (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Quando duas massas de ar com densidades diferentes tornam-se vizinhas, tendem a se manter individualizadas, como fluidos não miscíveis e, portanto, conservam suas características particulares. Há entre elas uma estreita camada de transição, conhecida como superfície frontal, ou frente. As frentes se classificam em quentes e frias, de acordo com as características térmicas da massa de ar que as seguem. O encontro de duas frentes (quente e fria) é chamado de sistema frontal.

As frentes frias tendem a se deslocar no sentido polo-equador, enquanto as frentes quentes migram no sentido oposto (LLOPART, 2012). Na Figura 4 pode-se observar a representação simbólica das frentes usualmente adotadas nas cartas sinóticas de superfície.

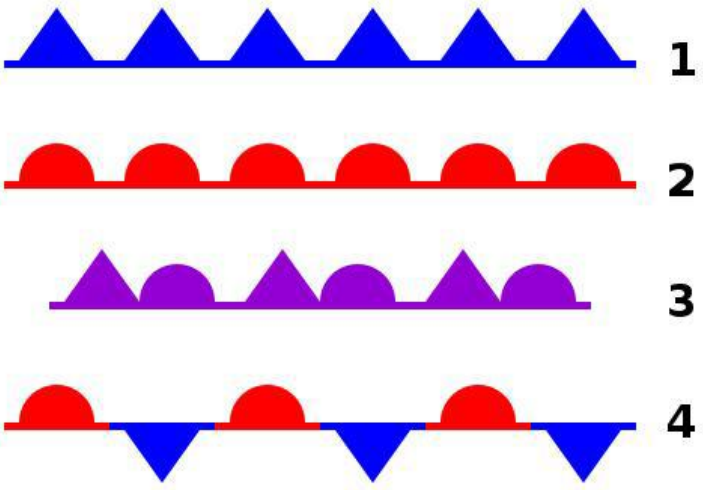


Figura 4. Representação simbólica das frentes. 1: frente fria; 2: frente quente; 3: frente oclusa; 4: frente estacionária (LLOPART, 2012).

Uma frente é dita fria quando sua passagem por um determinado local da superfície terrestre provoca a substituição o ar quente que existia antes no local por ar frio. Diz-se que a massa de ar pré-frontal (antes da passagem da frente) é quente e a massa de ar pós-frontal (após a passagem da frente) é fria. O ar frio, por ser mais denso, introduz-se como uma cunha por baixo do ar quente, obrigando-o a subir de forma abrupta e rápida, originando nuvens de grande desenvolvimento vertical, com fortes aguaceiros de curta duração. A frente fria também pode vir acompanhada de rajada de ventos (VAREJÃO-SILVA, 2006). A Figura 5 apresenta um modelo de frente fria e suas nuvens associadas.

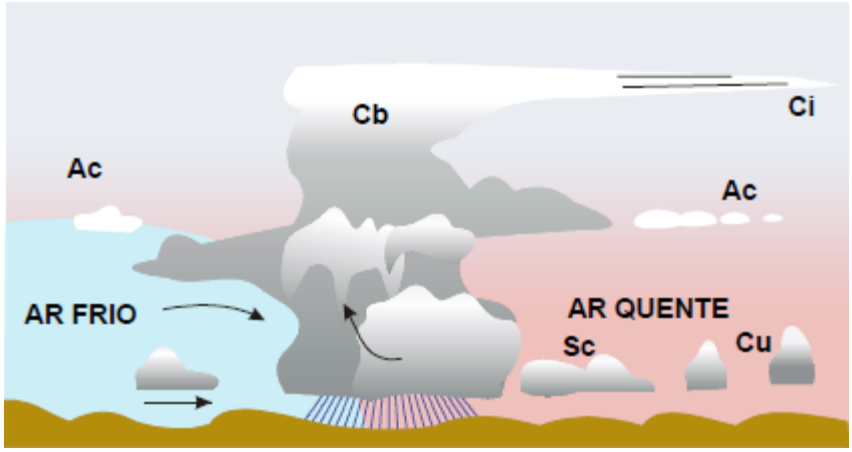


Figura 5. Modelo de uma superfície frontal fria, com o conjunto típico de nuvens associadas. Ac: altocumulus; Cb: cumulonimbus; Ci: cirrus; Sc: stratocumulus; Cu: cumulus (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Uma frente é denominada quente quando ocorre a invasão ou a passagem de uma massa de ar quente, que substitui o ar relativamente frio existente em uma determinada região da superfície da terra. Como o ar frio é mais denso, este oferece maior resistência ao deslocamento, provocando um deslocamento mais lento do sistema, com o ar quente avançando gradualmente sobre o ar frio anterior e esfriando lentamente, havendo formação de nuvens de desenvolvimento mais horizontal, podendo não ocorrer precipitação (VAREJÃO-SILVA, 2006). A Figura 6 mostra um exemplo de frente quente.

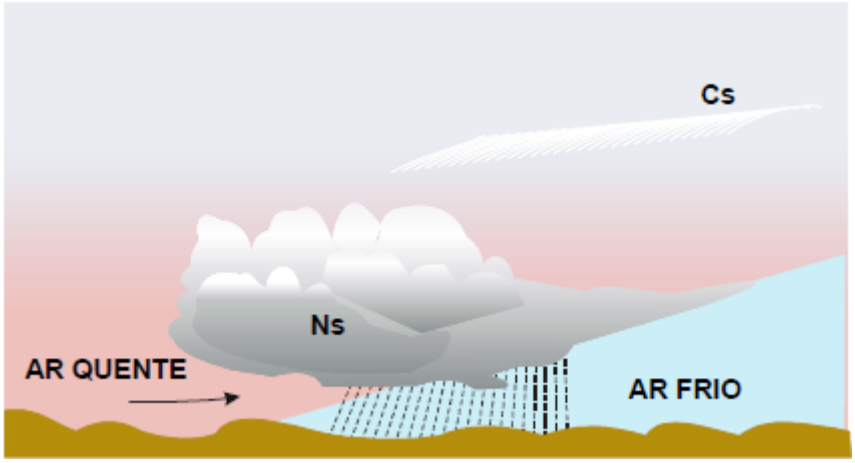


Figura 6. Modelo de uma superfície frontal quente, com o conjunto típico de nuvens associadas. Ns: nimbostratus; Cs: cirrostratus (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Outro sistema frontal ocorrente são as frentes oclusas, que se formam quando uma frente fria, movendo-se mais depressa que a massa de ar quente do local, por ser mais densa, ultrapassa a frente quente, fazendo com que a massa de ar quente eleve-se e deixe de tocar o chão, formando uma ilha de ar quente acima da massa de ar frio. Nessas situações, a chuva contínua característica das frentes quentes é seguida imediatamente pelos aguaceiros associados às frentes frias. Quando o ar que se move em direção à frente quente é mais frio que o ar subsequente da massa quente, esta frente oclusa é dita fria. Do contrário, quando a frente fria que se aproxima é menos fria que o ar subsequente da massa quente, a oclusão é do tipo quente (VAREJÃO-SILVA, 2006). A Figura 7 apresenta um esquema dos dois tipos de oclusão.

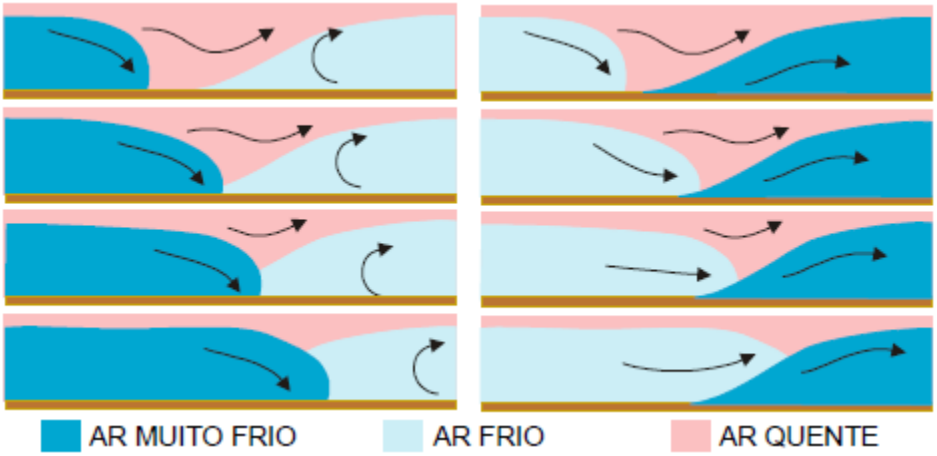


Figura 7. Sequência temporal esquemática da oclusão do tipo frio (esquerda) e do tipo quente (direita) (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Há ainda a frente denominada estacionária, que ocorre quando nenhuma das massas de ar (nem quente nem fria) está avançando (LLOPART, 2012).

Existe uma sazonalidade na ocorrência da passagem de frentes frias, as quais são mais frequentes de maio a setembro e menos frequentes durante o verão (dezembro a fevereiro) no Brasil. As frentes frias ocorrem durante todo o ano e em maior número na região Sul do Brasil, mas são mais numerosas de maio a outubro. Nas outras regiões, as frentes frias são raras durante o verão (LLOPART, 2012).

Embora no verão ocorram passagens de frentes sobre o sudeste do Brasil, que induzem convecção e precipitação nas regiões tropicais e subtropicais da América do Sul e que alimentam a Zona de Convergência do Atlântico Sul, estas nem sempre satisfazem ao critério considerado para a identificação de casos, que leva em consideração a queda de temperatura, o aumento da pressão e a mudança na direção do vento (LLOPART, 2012).

No inverno, os sistemas frontais se sucedem com maior frequência e velocidade de deslocamento, causando nebulosidade principalmente no litoral. Isto ocorre devido à impossibilidade do ar quente e úmido ser renovado durante um curto intervalo entre os sistemas frontais. Assim sendo, a nova frente fria irá encontrar o ar relativamente frio deixado pela precedente (LEMOS e CALBETE, 1996).

3.2.1.2. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é caracterizada como uma banda persistente de precipitação e nebulosidade orientada no sentido noroeste-sudeste, que se estende desde o sul da Amazônia até o Sudeste do Brasil e, frequentemente, sobre o oceano Atlântico Subtropical, bem caracterizada nos meses de verão.

Acompanhando o ciclo anual da chuva, observa-se a manifestação da ZCAS, uma das características mais marcantes do clima tropical da América do Sul durante o verão. A ZCAS (Figura 8) pode ser considerada como o principal sistema de grande escala responsável pelo regime de chuvas sobre o Brasil durante o verão austral, que vai de outubro a março (LLOPART, 2012).

Figura 8. Esquema ilustrativo de uma ZCAS e a marca usualmente adotada para indicá-la em uma carta sinótica (em vermelho) (LLOPART, 2012).

Embora tais características sejam observadas em todos os verões, importantes variações ocorrem na organização espacial, na intensidade das chuvas e na circulação. Essas variações, muitas vezes, são responsáveis pela ocorrência de eventos severos, alagamentos e deslizamentos de terra. Por outro lado, a ausência ou a supressão das chuvas e a descaracterização desse sistema podem

representar longos períodos de seca ou má distribuição das chuvas sobre grandes regiões do território brasileiro (LLOPART, 2012).

Os mecanismos que originam e mantém a ZCAS não estão ainda totalmente definidos, porém, estudos observacionais e numéricos indicam que esse sistema sofre influências tanto de fatores remotos quanto locais. Aparentemente, as influências remotas, tal como a convecção na Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS), modulam o início, duração e localização da ZCAS, enquanto os fatores locais são determinantes para a ocorrência desse fenômeno, ou seja, sem eles o sistema provavelmente não existiria (ROCHA e GANDU, 1996).

3.2.1.3. Alta Subtropical do Atlântico Sul

As Altas Subtropicais são sistemas de alta pressão, ou anticiclones, localizados em torno de 30 graus de latitude nos principais oceanos do planeta. Elas estão associadas à circulação média meridional da atmosfera, surgindo devido às células de Hadley. No Atlântico Sul, a Alta Subtropical (ASAS) é de grande importância para o clima da América do Sul.

A Alta Subtropical do Atlântico Sul, localizada na costa oriental da América do Sul, exerce influência decisiva sobre o tempo e o clima no Brasil, afetando a regiãotanto no inverno como no verão. No inverno, ela inibe a entrada de frentes, podendo causar inversão térmica e elevada concentração de poluentes nos principais centros urbanos das regiões sudeste e sul, afetando a saúde das pessoas e o meio ambiente em que vivem.Na região nordeste, a ASAS contribui para o regime de chuvas no litoral. A dinâmica desse sistema também favorece a formação de nevoeiros e geadas no sul e sudeste do Brasil. Por outro lado, no verão, o transporte de umidade nos baixos níveis troposféricos ao longo da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), são afetados pela circulação associada à ASAS (Kodama, 1993; Quadro, 1994; *apud* BASTOS e FERREIRA, 2000).

Vianello e Alves (1991) observaram que os centros de pressão modificam-se do inverno para o verão, causando as diferenças de temperatura do ar de uma estação para outra. Durante o inverno, as temperaturas são menores sobre os continentes, em consequência os centros de alta pressão migram para o continente. No verão, as temperaturas sobre os continentes são maiores, e os centros de alta pressão localizam-se sobre os oceanos e são mais determinados, como mostra a Figura 9 (BASTOS e FERREIRA, 2000).

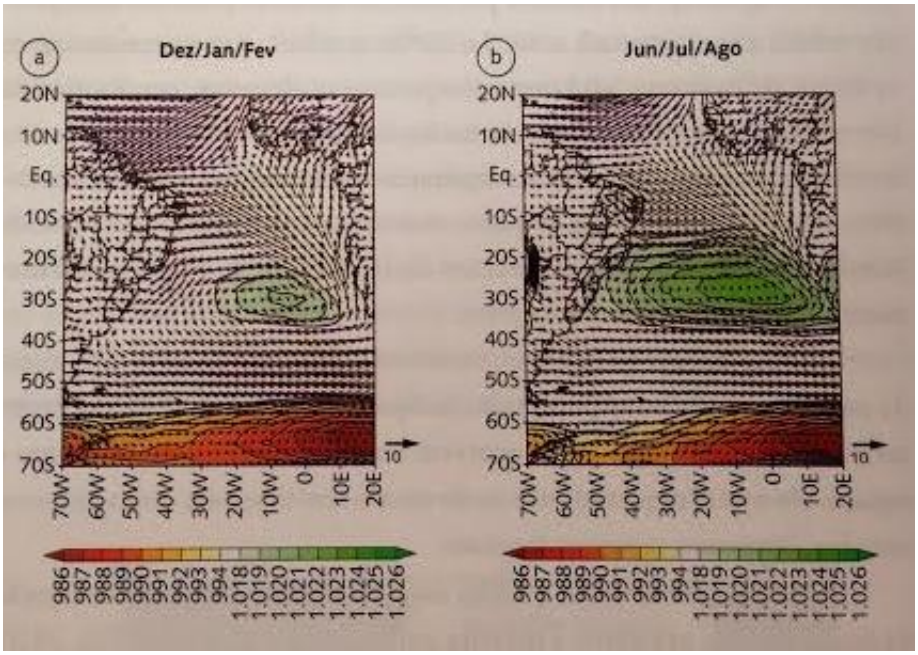


Figura 9. Posicionamento da ASAS no período de verão (esquerda), com centro sobre o oceano, e no inverno (direita), quando seu centro desloca-se mais para o norte e oeste, atingindo a costa do Brasil.
(CAVALCANTI *et al*, 2009).

4. Região de estudo

A Região da Grande Vitória (RGV) é um dos principais polos de desenvolvimento urbano e industrial do Estado do Espírito Santo. Sua população equivale a 48% da população do estado, apesar de ocupar apenas 5% do território capixaba (IJSN, 2008). A Figura 10 apresenta um mapa identificando a RGV e os cinco municípios que a compõem: Cariacica, Serra, Viana, Vila Velha e Vitória.

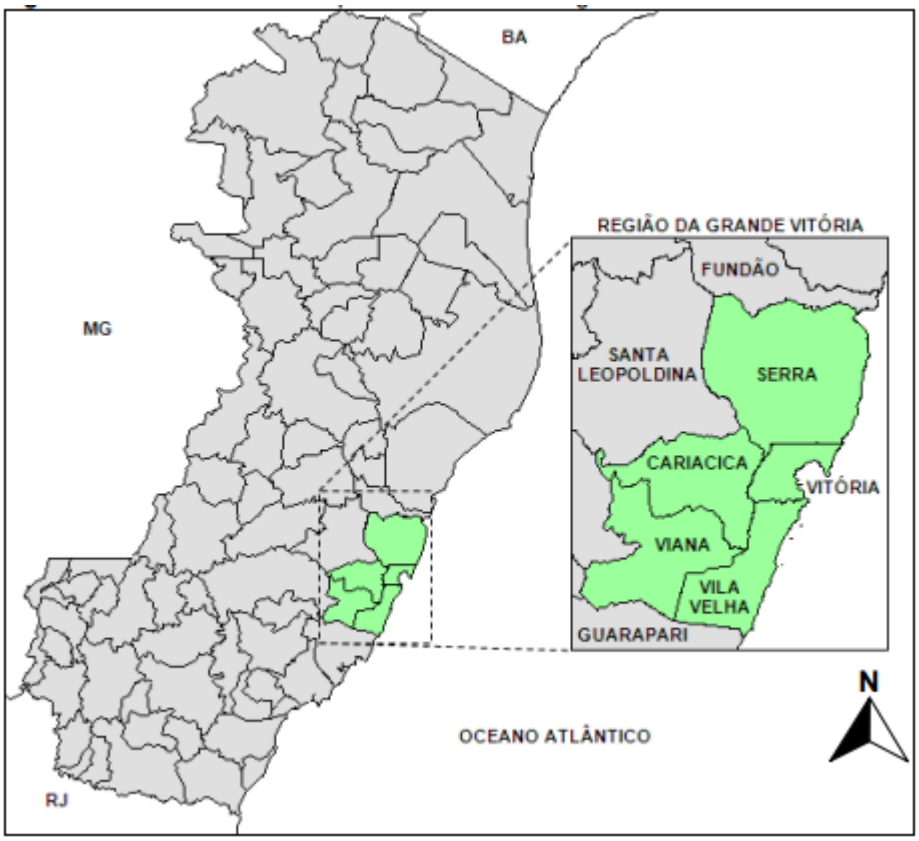


Figura 10. Região da Grande Vitória e seus municípios.
(IEMA, 2011)

Composta de cinco municípios, a RGV ocupa uma área de aproximadamente 2.000 km², e tem uma população estimada em 1,5 milhão de habitantes, o que equivale a uma densidade populacional de aproximadamente 750 habitantes por quilometro quadrado (IBGE, 2010).

De acordo com o relatório anual do IEMA (2006), cerca de 55 a 65% das atividades industriais potencialmente poluidoras do Espírito Santo, tais como siderurgia,

pelotização, mineração (pedreiras), cimenteiras, indústria alimentícia, usina de asfalto e outras, estão instaladas na RGV.

A Figura 11 apresenta a localização das fontes emissoras de origem industrial na RGV. Pode-se observar que a maioria das fontes encontra-se a nordeste da cidade de Vitória, Cariacica, Viana e Vila Velha e a sudeste da Serra.

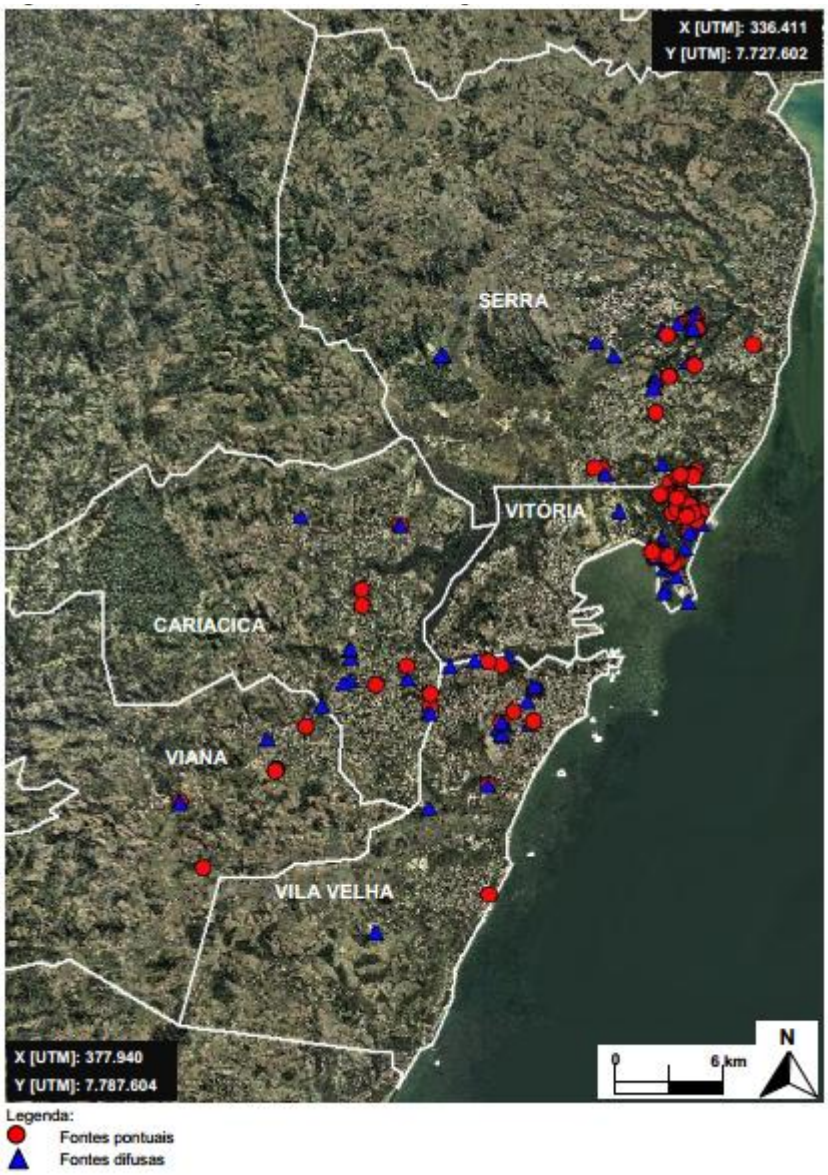


Figura 11. Localização das fontes emissoras de origem industrial na RGV. (Fonte: IEMA, 2011).

4.1. Clima e relevo

A região sudeste do Brasil apresenta grande contingente populacional, alta densidade demográfica e responde por uma parcela expressiva das atividades econômicas do país. Sua população corresponde a 42,6% do total populacional do país. Essa concentração populacional torna o Sudeste bastante sensível as condições climáticas, pois elas condicionam atividades econômicas importantes, como a agropecuária, além do abastecimento urbano e geração de energia hidroelétrica (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

Sua área estende-se entre aproximadamente 14° e 25° de latitude sul, e isso, além da grande diversidade dos demais atributos físicos, assegura-lhe uma posição geográfica diferenciada, que é estar na borda oriental da América do Sul, atravessada pelo Trópico de Capricórnio e com a maior parte de suas terras nos trópicos. Do ponto de vista climático, isso se traduz por um fluxo considerável de energia ao longo do ano, distribuição das precipitações altamente irregular no espaço e no tempo, elevada evaporação em setores mais ao norte e continentais, e participação importante de condições anticiclonais, contribuindo para que a região sudeste, mais do que qualquer outra do país, apresente variada gama de regimes climáticos, que vão do tropical ao subtropical. Logo, esta região apresenta grandes contrastes devido à sua posição latitudinal e por estar na borda do oceano, conforme enfatizaram Schroeder (1958), Nimer (1989) e Sant'anna Neto (2005).

Ainda segundo Cavalcanti *et al.* (2009), as características climáticas da região sudeste refletem a situação do escoamento atmosférico médio, condições oceânicas vizinhas e a situação dos centros de ação e perturbações gerais, que influenciam a penetração dos sistemas atmosféricos. Atuam na área distintos mecanismos, com a invasão de sistemas mais frios, que contrastam com o domínio de massas mais quentes, em combinação com as feições locais. A região também sofre influência de diversos fenômenos de grande escala, e os impactos de alguns deles, como os eventos de El Niño e La Niña, ainda são parcialmente conhecidos.

Entre os atributos do meio físico que condicionam o clima da região Sudeste, merecem atenção a maritimidade e continentalidade, que influencia as condições

de temperatura e a disponibilidade da umidade, e a topografia que mesmo não tão elevada, promove turbulência constante por ser acidentada.

Por sua posição e pelo arranjo dos fatores geográficos, a região é envolvida pelas principais correntes de circulação atmosférica da América do Sul, sendo uma faixa de conflito entre as massas de ar distintas, com participação de correntes tropicais marítimas de leste-nordeste, correntes polares de sul e correntes do interior de oeste-noroeste. A região marca ainda a transição entre os regimes permanentemente úmidos do Brasil Meridional e alternadamente secos e úmidos do Brasil Central (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

O estado do Espírito Santo é caracterizado por ser uma região de topografia complexa e que sofre influência direta do clima do oceano Atlântico Sudoeste. O relevo da RGV é caracterizado por cadeias montanhosas nas porções Noroeste (Mestre Álvaro) e Oeste (Região Serrana); além de planícies (Aeroporto e manguezais) e planaltos (Planalto Serrano) na porção Norte da Região. A porção Sul é mais caracterizada por planícies (Barra do Jucu). Todas as porções são intercaladas por maciços rochosos de pequeno e médio porte. As condições de relevo da região, no geral, são em grande parte favoráveis à circulação de ventos para dispersão de poluentes (IEMA, 2007).

Em relação ao clima, a RGV apresenta clima tropical quente e úmido. Esse tipo climático se caracteriza pelo inverno ameno e seco, e verão chuvoso e quente. O período quente se estende aproximadamente de outubro a abril, com maior intensidade em dezembro e janeiro. No inverno, a temperatura média do mês mais frio é em torno de 21°C (Figura 12), sendo a sensação de frio verificada esporadicamente quando há ocorrência de frentes frias (IEMA, 2007).

Os principais sistemas de circulação atmosférica que atuam na região são a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que é uma massa tropical marítima, apresenta temperaturas elevadas, resultantes da intensa radiação solar característica das latitudes tropicais, além de alta umidade, por causa da intensa evaporação marítima. A circulação atmosférica anti-horária (anticiclônica) associada a este sistema, sobre a região litorânea do Brasil e o Atlântico Sudoeste abaixo da latitude

de 10°S, é predominantemente dos quadrantes Norte e Leste (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

No inverno, o anticiclone se desloca para próximo do continente, podendo inibir a passagem dos sistemas frontais, propiciando uma atmosfera estável, com ventos calmos, muitas vezes acompanhados de inversão térmica. Durante o verão a ASAS encontra-se mais ao sul e deslocado zonalmente mais para leste (sobre o oceano Atlântico). Nessa estação do ano, uma banda de nebulosidade orientada no sentido Noroeste-Sudeste desenvolve-se periodicamente sobre o Sudeste do Brasil, coincidindo com a estação chuvosa da região. A permanência dessa banda convectiva por vários dias caracteriza a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS e os sistemas frontais que se deslocam sobre a região Sudeste e em seguida sobre o oceano atingem a porção oeste da ASAS e, como resultado, esse sistema de alta pressão é frequentemente dividido, ficando em média, enfraquecido quando comparado a situação do inverno (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

A Figura 12 e a Figura 13 apresentam os gráficos das normais climatológicas de precipitação e temperatura média para a localidade de Vitória/ES, entre 1961 a 1990, disponibilizados pelo INMET (INMET, 2013). Vale lembrar que a Organização Meteorológica Mundial (OMM) define Normais como “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas” (WMO, 1984), ou seja, esses dados representam a média histórica para a região.

Pode-se observar que, historicamente, a temperatura média para a região é de aproximadamente 24°C, com uma leve queda nos meses do inverno (junho a setembro) e temperaturas mais altas no verão e início do outono (dezembro a março). Em relação à precipitação, nota-se que o inverno é o período mais seco, com o mês de agosto tendo a menor incidência de precipitação, historicamente. Já o verão é o período mais chuvoso, sendo dezembro o mês com maior nível de precipitação.

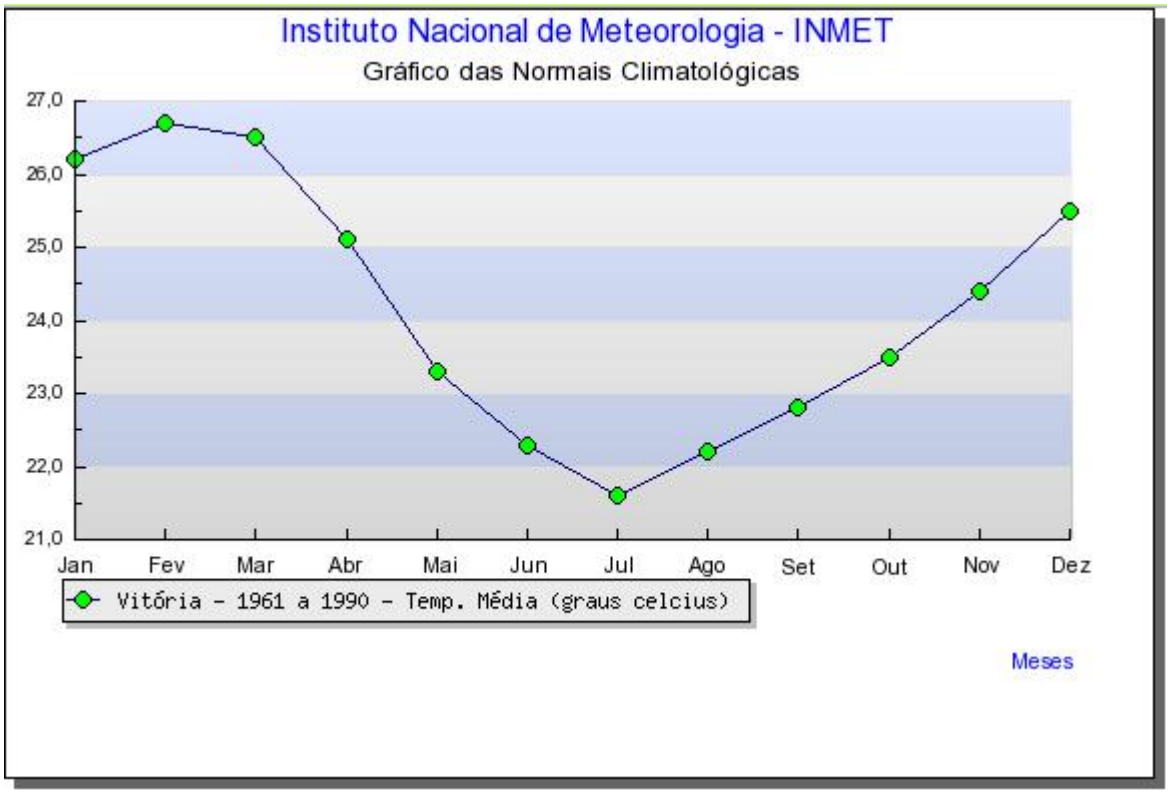


Figura 12. Gráfico da temperatura média para o município de Vitória para o período de 1961 a 1990.

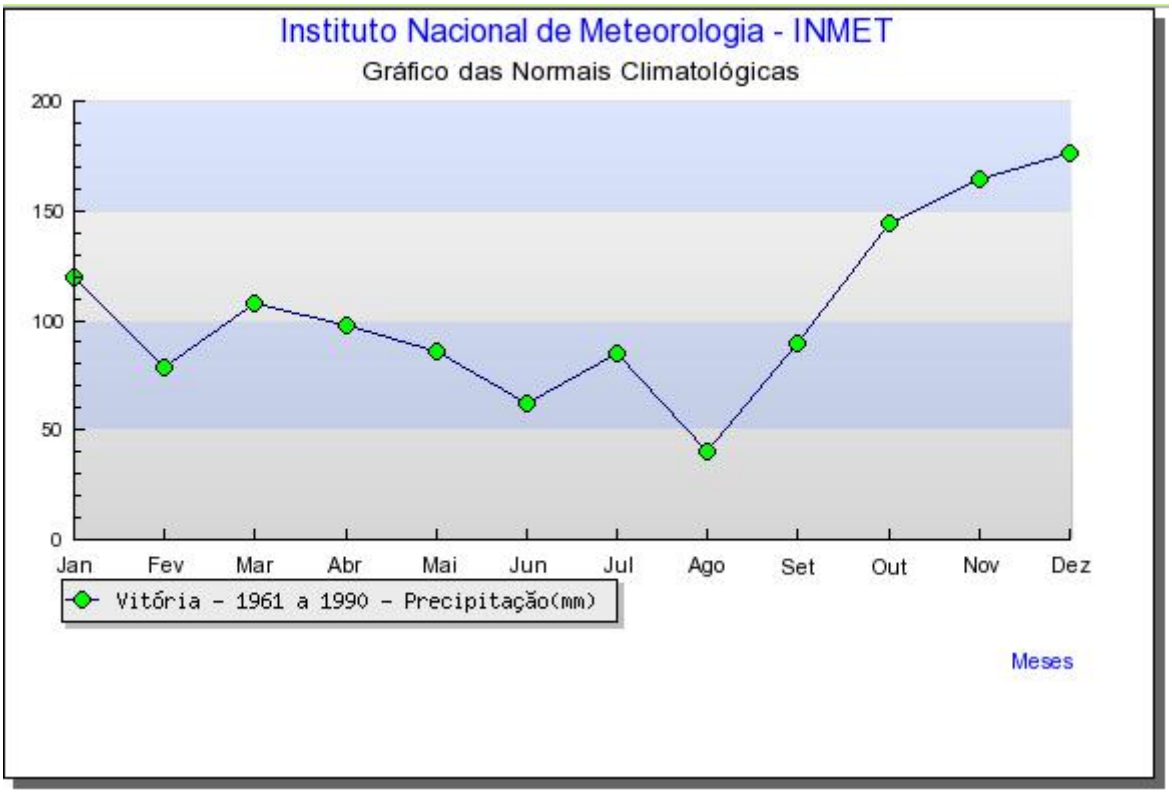


Figura 13. Gráfico da precipitação para o município de Vitória para o período de 1961 a 1990.

Com relação à velocidade e direção do vento, resultados obtidos por Maioli (2011) durante o ano de 2010, utilizando dados da estação localizada no Aeroporto de Vitória da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET), indicam que, levando-se em consideração todo o ano, os ventos predominantes são do primeiro quadrante, variando entre norte, nordeste, e leste, corroborando outros estudos que apontam o mesmo resultado, como o apresentado no Relatório da Qualidade do Ar da RGV de 2007 (IEMA, 2007).

O estudo de Maioli indica predominância dos ventos norte e nordeste nos meses de janeiro a março e o início de mudança da direção dos ventos dominantes no mês de abril quando se iniciam ventos sul e oeste. A partir do mês de setembro, a direção predominante do vento passa novamente para o norte e nordeste, onde se mantém novamente até março. Para o período avaliado, a intensidade média horária dos ventos esteve em torno de 4,0 m/s chegando a no máximo 17,0 m/s, sendo que os períodos de calmaria variaram entre 4% e 19%.

4.2. Qualidade do ar na RGV

A qualidade do ar na região da Grande Vitória é determinada por um conjunto de fatores, como as condições meteorológicas, relevo e as fontes de emissões atmosféricas. Na RGV existem fontes emissoras de poluentes atmosféricos de diferentes tipologias, tais como as vias de tráfego, indústrias de diversos segmentos, portos, aeroportos, emissões residenciais e comerciais, dentre outras (IEMA, 2011). As emissões industriais são as principais contribuintes para a poluição do ar em Vitória, entretanto o crescimento da frota veicular e empreendimentos imobiliários estão alterando essa característica para o parâmetro material particulado em alguns pontos na região (IEMA, 2007).

Em relação ao material particulado, de acordo com o Inventário de Emissões da RGV (IEMA, 2011), a taxa de emissão de material particulado total na Grande Vitória é de 4.043,1 kg/h, e de material particulado fino ($MP_{2,5}$) é de 1.487,5 kg/h, ou seja, as emissões de $MP_{2,5}$ representam 36% das emissões de material

particulado da região. Como pode ser observado na Figura 14, as maiores fontes de emissão de $MP_{2,5}$, conforme o inventário de emissões realizado pelo IEMA (IEMA, 2011), são veiculares – ressuspensão de partículas (63,5%), industrial – minero-siderúrgica (18,3%) e veiculares – escapamento e evaporativa (7,2%), além de contribuições do setor de logística (portos e aeroporto) (6,5%) e veiculares oriundas de desgaste de pneus (2,8%).

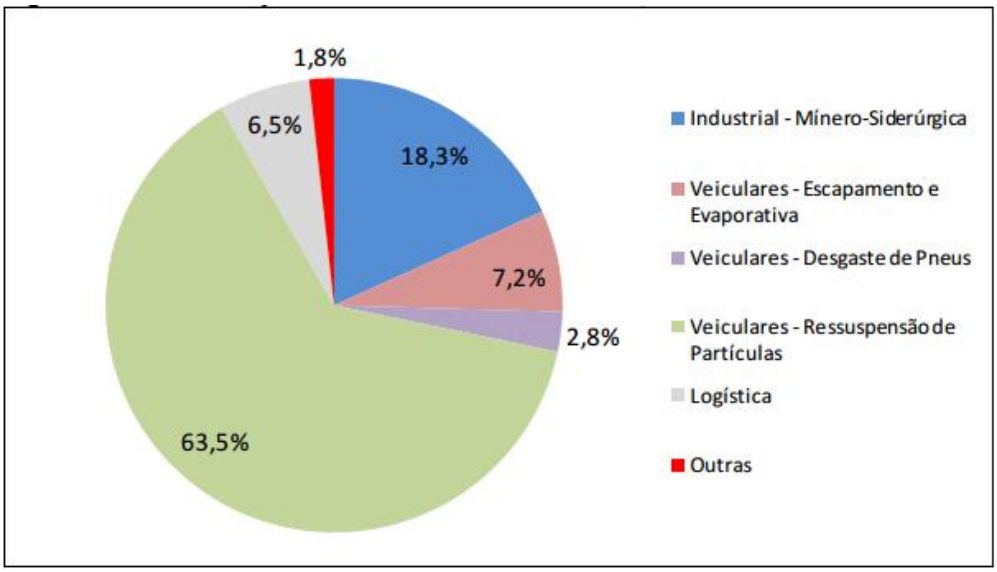


Figura 14. Distribuição das taxas de emissão de $MP_{2,5}$ na RGV (IEMA, 2011).

A RGV possui uma Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar – RAMQAR, inaugurada no ano 2000, de propriedade do IEMA e gerenciada por este Instituto. A RAMQAR é distribuída em oito estações localizadas estrategicamente na Grande Vitória, sendo estas: Estação Laranjeiras, Carapina, Jardim Camburi, Enseada do Suá, Vitória – Centro, Ibes, Vila Velha – Centro e Cariacica (Figura 15). Estas estações quantificam o comportamento dos seguintes poluentes atmosféricos: PTS; MP_{10}; Ozônio (O_3); Óxidos de Nitrogênio (NO_X); Óxidos de Enxofre (SO_X); Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarbonetos (HC). Para complementar a análise da qualidade do ar realiza-se ainda, nas estações de Carapina, Enseada do Suá, Ibes e Cariacica, o monitoramento dos seguintes parâmetros meteorológicos: direção e velocidade dos ventos, precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar, temperatura, pressão atmosférica e radiação solar. A Figura 15 apresenta o posicionamento das estações de monitoramento da RAMQAR na RGV.

Figura 15. Estações de monitoramento da RAMQAR na RGV.

De acordo com o último relatório apresentado pelo IEMA (2007), o resultado do monitoramento do ar das estações da RAMQAR apresentou qualidade do ar, na maior parte do tempo, caracterizada como “boa” com algumas situações de condição “regular”, segundo a referência estabelecida pelos padrões legais da Resolução CONAMA Nº 03/1990. PTS, MP_{10} e Ozônio apresentaram as concentrações relativas mais altas, mesmo estando sempre abaixo dos padrões primários de qualidade do ar.

5. Metodologia

Para a realização deste trabalho, foram definidas quatro atividades principais. A primeira foi a coleta do $MP_{2,5}$ em 6 pontos da região da Grande Vitória durante o inverno de 2013, com a utilização de 6 equipamentos de amostragens. Os locais monitorados foram as estações da RAMQAR de Cariacica, Ibes, Vitória – Centro, Jardim Camburi, Enseada do Suá e Laranjeiras, escolhidas de maneira a abranger toda a RGV. A segunda atividade foi a análise gravimétrica dos filtros coletados, para determinação da concentração de $MP_{2,5}$ nos pontos monitorados e realização de tratamentos estatísticos dos dados.

A terceira atividade consistiu na utilização de um contador de partículas a laser, o Laser Aerossol Spectrometer (LAS), com o objetivo de obter a distribuição de tamanho em relação ao diâmetro e número das partículas da região. O aparelho foi colocado em operação ao lado do prédio de Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), também durante o inverno de 2013, nos meses de agosto e início de setembro, por este período se tratar do período mais crítico com relação às partículas.

A quarta e última atividade foi relacionar o dados de concentração de $MP_{2,5}$ encontrados com os dados meteorológicos e os eventos sinóticos ocorrentes na região durante o período amostrado.

5.1. Locais e período de amostragem

No inverno de 2013 (21 de junho a 21 de setembro) foi realizada uma campanha experimental para amostragem do aerossol na atmosfera da RGV, a fim de avaliar o comportamento e as variações nas concentrações das partículas com relação à dispersão dos poluentes atmosféricos. Na amostragem foram utilizados dois equipamentos: o MiniVol (MV), para quantificar a massa de $MP_{2,5}$ na região, e o Laser Aerosol Spectrometer (LAS), contador de partículas a laser utilizado para determinação da distribuição de número de partículas.

Os locais de amostragem do MiniVol foram seis das oito estações da RAMQAR – Rede Automática de Monitoramento de Qualidade do Ar – da Região da Grande Vitória. As seis estações monitoradas foram: Laranjeiras, Ibes, Vitória Centro, Enseada do Suá, Jardim Camburi e Cariacica. Para o equipamento LAS, o local de amostragem foi na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao lado do prédio de Engenharia Ambiental. A escolha dos locais monitorados foi realizada com base na representatividade dos pontos para a região de estudo, além da infraestrutura e segurança para acondicionamento dos amostradores. A Figura 16 apresenta os pontos monitorados na RGV pelo MiniVol, com indicação para o ponto monitorado pelo LAS.

Figura 16. Locais amostrados com o MiniVol (em vermelho) e pelo LAS (em amarelo). Fonte: Google Earth.

O período de amostragem do MiniVol foi de 21 de junho, primeiro dia do inverno, à 21 de setembro, último dia do inverno para o Hemisfério Sul. A amostragem foi feita em dias alternados, 24 horas por dia amostrado, em um total de 47 dias amostrados. O LAS, por sua vez, funcionou 24 horas por dia entre os dias 07 de

agosto a 02 de setembro, com exceção dos dias 16 e 17, resultando em 25 dias amostrados.

5.2. Equipamentos e procedimentos de amostragem do aerossol

5.2.1. MiniVol

O MiniVol TAS (Tactical Air Sampler) (Figura 17) é um aparelho fabricado pela AIRMETRICS que permite quantificar separadamente os níveis de PTS, MP_{10} e $MP_{2,5}$. A entrada do amostrador é composta de um impactador, configurado de acordo com o tamanho de partícula desejado, efetuando a separação das partículas e coletando apenas a fração desejada em um filtro, cujo material deve permitir a passagem do ar e a retenção das partículas desejadas. Os principais materiais utilizados para essa finalidade são o quartzo, o teflon, a fibra de vidro, dentre outros.

Figura 17. Equipamento MiniVol, da AIRMETRICS.

A impactação inercial, mecanismo utilizado pelo MiniVol (MV) para realizar a separação das partículas, representa o impacto da partícula contra um obstáculo, fazendo com que a partícula que estava em movimento diminua a sua energia e se separe do fluxo gasoso que a transportava. Neste mecanismo é evidente a

influência da velocidade e da massa das partículas. É um mecanismo importante para partículas de diâmetros maiores que 0,5 µm. O controle de partículas por impactação é geralmente conseguido através de pequenos obstáculos secos (fibra de tecido, por exemplo) ou úmidos (gotas, graxas) (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 2000). A Figura 18 apresenta um esquema no mecanismo de captura por impactação inercial.

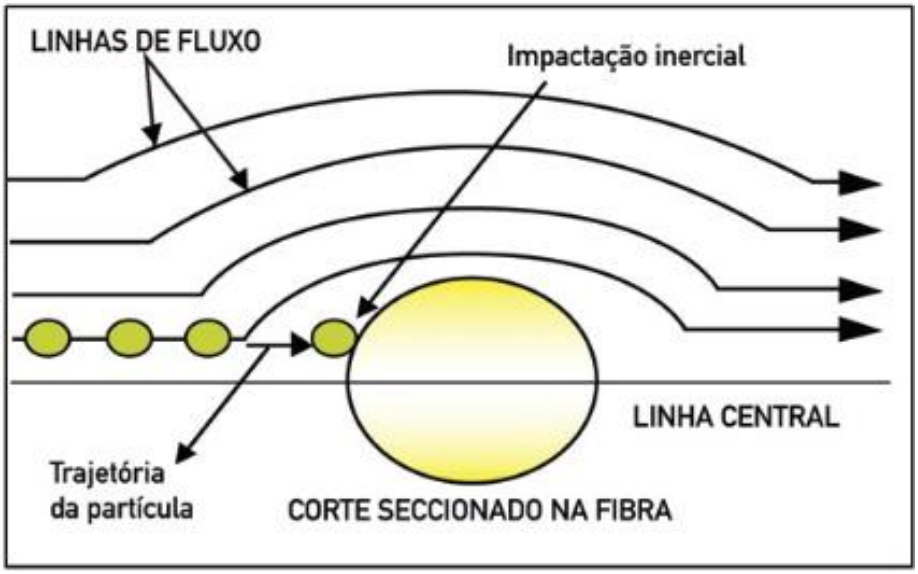


Figura 18. Esquema do mecanismo de impactação inercial.

Os dois tipos de configuração do amostrador do MiniVol estão apresentadas na Figura 19 e na Figura 20. Após a entrada do ar no impactador, as partículas que se desviam da trajetória do ar se impactam no disco do impactador, que contém uma camada de graxa, onde as partículas ficam retidas. Há dois tipos de impactadores no MV: um para coletar partículas maiores de 10 µm e outro para coletar partículas entre 10 e 2,5 µm.

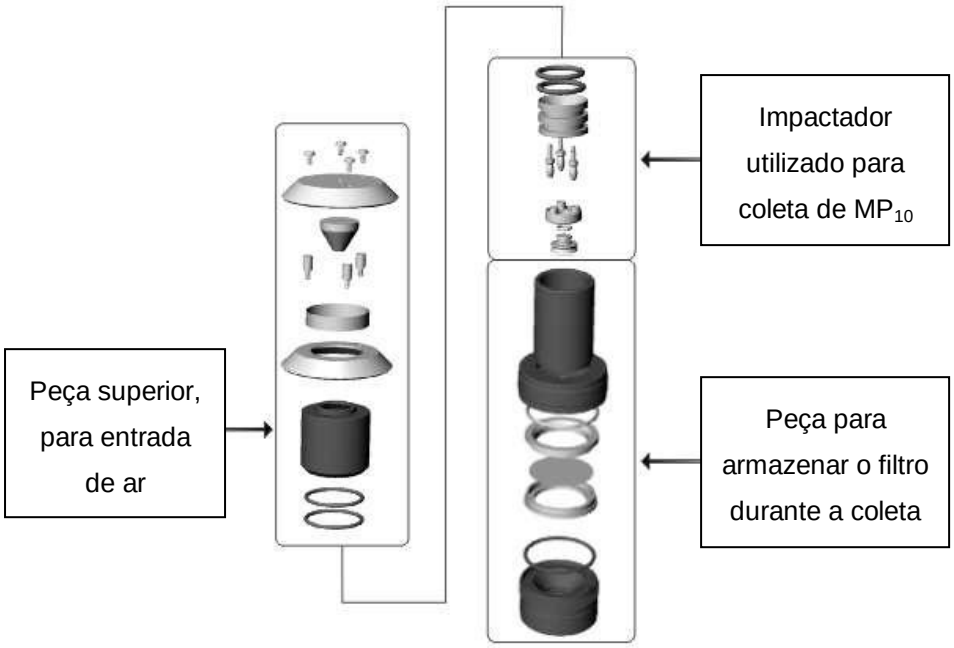


Figura 19. Configuração do amostrador para coleta de MP_{10}.

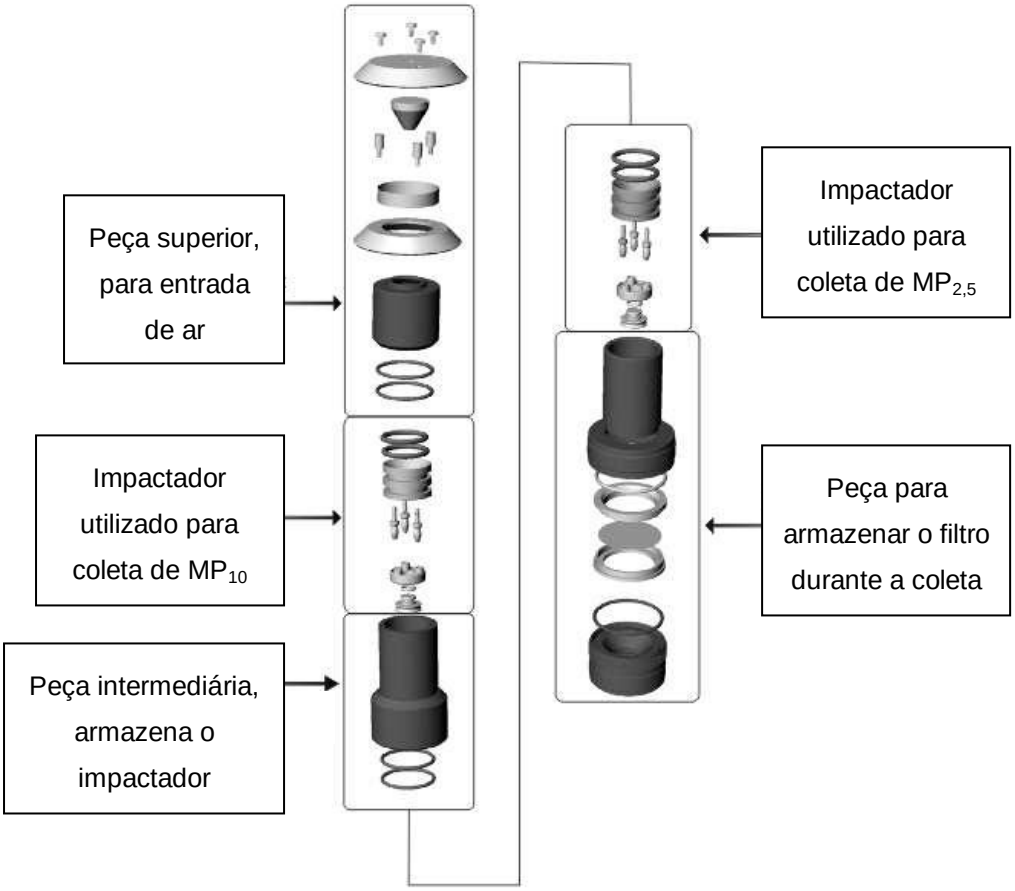


Figura 20. Configuração do amostrador para coleta de $MP_{2,5}$.

A entrada do amostrador MiniVol é composta por 3 partes que podem ser organizadas de forma a haver os dois, um ou nenhum impactador, dependendo do tamanho de partícula que deseja-se coletar. O MiniVol pode operar para coletar material particulado com diâmetro menor que 10 µm (MP_{10}), configurando-se o amostrador para operar com apenas um impactador; ou coletar partículas com diâmetro menor que 2,5 ($MP_{2,5}$), utilizando-se os dois impactadores; ou partículas totais sedimentáveis (PTS), quando não há nenhum impactador no amostrador. Após passar pelos impactadores (quando há), o ar coletado passa por um filtro que retém o material particulado que ainda há nele. A Figura 19 mostra cada parte do amostrador, além da localização do filtro, para coletar MP_{10} e a Figura 20 mostra o mesmo esquema, por sua vez, para coletar $MP_{2,5}$.

O MiniVol é calibrado para as condições padrão de pressão atmosférica (760 mmHg) e temperatura (298 K) e ajustado para operar com uma vazão de 5,0 L/min nessas condições. Sob condições diferentes destas, a vazão real que passa pelo amostrador pode ser calculada utilizando-se os valores reais de temperatura e pressão do local amostrado e a curva de regressão para calibração de cada equipamento. Para uma vazão indicada pelo rotâmetro do amostrador (Q_{ind}), a vazão real para as condições de operação é dada pela seguinte equação (AIRMETRICS, 2011):

$$Q_{real} = (m_{vol} \times Q_{ind} + b_{vol}) \times \sqrt{\frac{P_{pad}}{P_{real}} \times \frac{T_{real}}{T_{pad}}}$$

Onde Q_{real} é a vazão nas condições de operação (L/min); Q_{ind} é vazão indicada pelo rotâmetro do amostrador (L/min); m_{vol} e b_{vol} são, respectivamente, a declividade e a interseção da curva de regressão linear, dados específicos de cada aparelho, fornecidos pela curva de calibração que acompanha cada MiniVol; P_{pad} é a pressão e T_{pad} a temperatura nas condições padrão; P_{real} é a pressão e T_{real} a temperatura nas condições de operação.

Para cada um dos 6 equipamentos utilizados, a curva de calibração foi refeita, por meio de um dispositivo medidor de vazão certificado pelo National Institute of Standards and Technology (NIST), que calibrou cada aparelho, obtendo-se novos

valores de declividade (m_{vol}) e interseção (b_{vol}) da curva de regressão linear de cada equipamento.

Para este experimento, a temperatura e pressão reais adotadas foram os valores médios do dia amostrado, medidos na estação da REDEMET instalada no aeroporto de Vitória (REDEMET, 2013), e a vazão indicada pelo mostrador (Q_{ind}) foi de 5,0 L/min em todos os equipamentos. Assim, obteve-se a vazão real (Q_{real}) de cada dia em cada equipamento, podendo assim ser calculado o volume de ar amostrado para o cálculo da concentração.

O material particulado foi coletado em filtros de *teflon* da *Whatman* de 46,2 mm de diâmetro, com eficiência de 99,7% de retenção para partículas de até 0,3 µm (Figura 21). Neste procedimento, os filtros foram acondicionados em placas petri, que foram armazenadas em um dessecador apropriado, com temperatura mantida entre 20°C a 23°C e umidade relativa entre 30% a 40%, conforme orientações da norma de monitoramento para $MP_{2,5}$ da Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA, 1998). Essa medida garante que os filtros não adquiram umidade, de maneira que esta não influencie no peso dos filtros. Além disso, a manipulação dos filtros foi feita apenas com a utilização de luvas e pinça, dentro de uma capela (Figura 22), para evitar qualquer tipo de contaminação externa.

a) b)

Figura 21. Filtro de teflon da Whatman utilizado nas amostragens. (a) Embalagem dos filtros. (b) Filtro de teflon.

Figura 22. Capela utilizada para as pesagens e manuseamento dos filtros.

O material coletado pelo MV foi analisado por análise gravimétrica para obtenção da massa de $MP_{2,5}$. Antes e depois de cada amostragem é realizada a pesagem de cada filtro, e a diferença de massa resulta na massa total coletada. Para as pesagens foi utilizada a balança analítica Sartorius com precisão de seis casas decimais (1 µg), localizada no mesmo laboratório de armazenagem dos filtros (Figura 23). O ambiente da balança também foi mantido sob condições controladas, em uma sala com ar condicionado constantemente ligado, de forma a não influenciar na umidade dos filtros.

Figura 23. Balança analítica utilizada para a pesagem dos filtros.

Foram realizadas pesagens de filtros “brancos de campo” e filtros “brancos de laboratório”. Filtros “brancos de campo” são filtros não amostrados, que foram levados até os locais de amostragem e retornados para as condições de acondicionamento, e os “brancos de laboratório” são filtros também não amostrados que foram mantidos em acondicionamento durante o período de amostragem. Ambos são utilizados para determinar uma possível contaminação ou perda de material durante os processos de transporte/manuseio/acondicionamento dos filtros. Seguindo os critérios da USEPA (1998), um branco de campo foi realizado a cada 7 amostragens, e um branco de laboratório a cada pesagem que, neste caso, foi realizada a cada 15 dias, aproximadamente. Filtros brancos de campo com variação superior a 30,0 µg e filtros brancos de laboratório com variação superior a 15,0 µg geram incertezas muito altas e, desta forma, todos os filtros amostrados durante aquela semana devem ser descartados.

A partir da vazão de captação do ar durante a amostragem e o tempo de amostragem, calculou-se o volume de ar total amostrado e, uma vez determinadas as massas, calculou-se a concentração de MP do filtro. O filtro branco que gerou a maior incerteza foi utilizado como a incerteza das medidas de todas as amostras daquele período. Assim, a concentração final de cada filtro é dado pela fórmula:

$$C = \frac{m_f - m_i}{Q} \pm incerteza$$

Onde m_f é a massa final do filtro, após a coleta; m_i é a massa inicial, antes da coleta; Q é a vazão de ar que passou pelo filtro durante as 24 horas amostradas, e é dada por $Q = velocidade\ do\ ar\ \left(\frac{m^3}{h}\right) * 24\ h$; e $incerteza$ é o valor da maior incerteza obtida entre o branco de campo e o branco de laboratório daquele período.

5.2.2. LAS

O Laser Aerossol Spectrometer (LAS) (Figura 24) é um contador de partículas a laser, fabricado pela GRIMM AEROSOL. O LAS é um aparelho portátil feito para contagem contínua do material particulado atmosférico segundo sua faixa de diâmetro. O LAS é o aparelho ideal para uma determinação rápida e precisa de concentração em número de partículas, distribuição de tamanho de partículas, partículas totais e várias faixas de diâmetro de aerossóis.

O aparelho utiliza uma entrada simétrica e radial de amostragem para extrair a amostra de aerossol a uma taxa de fluxo de 1,2 L/min, independente da direção do vento, com uma bomba de controle de fluxo incorporada. A velocidade de entrada de ar está de acordo com a inalação humana de modo que o LAS é recomendado para muitas aplicações de higiene industrial. A amostra de ar entra no aparelho de tal maneira que apenas uma partícula após a outra pode atravessar o volume óptico iluminado a laser. Cada partícula passando o laser gera um sinal de dispersão, que é recebido a um ângulo de espalhamento de 90° em um espelho e um fotodiodo. Este sinal é classificado por um analisador de altura de pulso e armazenado nos bancos de dados apropriados. O sinal é, em seguida, enviado para um micro-processador e atualizado a cada 1 minuto como a distribuição de tamanho de partícula para todas as faixas de tamanho.

Os dados são fornecidos na unidade número de partículas por litro permitindo quantificar partículas entre 0,25 µm a 32,0 µm, que correspondem as partículas das modas de acumulação e grossa.

(a) (b)

Figura 24. Laser Aerossol Spectrometer (LAS), fabricado pela GRIMM AEROSOL. (a) Casa de proteção de intempéries. (b) Foto superior: por dentro da casa de proteção; foto inferior: o aparelho LAS.

Todos os dados coletados são armazenados em um cartão de memória do aparelho e, utilizando um cabo RS-232 e o software DustMonitor, são transferidos para um computador onde podem ser analisados. Os resultados fornecidos pelo aparelho são o número de partículas por litro em 31 intervalos de diâmetros de partícula, entre 0,25 µm e 32,0 µm. É gerado um dado para cada minuto amostrado. Além disso, são fornecidos também gráficos do número de partículas por litro versus o tempo amostrado, para qualquer intervalo de diâmetro. Com esses dados é possível realizar gráficos de distribuição de tamanho por número das partículas amostradas.

5.3. Dados meteorológicos

Durante todo o período de amostragem (21 de junho a 21 de setembro) foram coletadas as cartas sinóticas publicadas pelo CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, que forneceram as ocorrências sinóticas do período, como frentes frias, ASAS, dentre outros. Adicionalmente, foram coletadas as sínteses sinóticas mensais, também disponibilizadas no site do CPTEC, que apresentam o resumo das ocorrências sinóticas de cada mês.

Os parâmetros meteorológicos temperatura, umidade e precipitação foram coletados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), estação esta que fica situada no *Campus* Universitário de Goiabeiras da UFES. Além disso, foram coletados os dados horários da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET) para direção e velocidade do vento, a qual fica localizada dentro do aeroporto de Vitória. Esses dados foram utilizados para realizar a caracterização meteorológica do período, a fim de avaliar as mudanças nas concentrações de material particulado com as ocorrências meteorológicas.

6. Resultados e discussão

6.1. Condições meteorológicas do período

Como já dito anteriormente, a qualidade do ar de uma determinada região está diretamente relacionada com as fontes de emissão e com as condições meteorológicas da mesma, como por exemplo, a direção e velocidade de vento, precipitação pluviométrica, umidade relativa, temperatura, etc. A variação desses parâmetros meteorológicos na atmosfera pode dificultar ou facilitar a dispersão e/ou remoção dos poluentes. Devido a esse comportamento se faz necessário fazer uma avaliação das condições atmosféricas do período monitorado para correlacionar os resultados de concentração de poluentes obtidos em determinadas condições meteorológicas.

Para a realização deste trabalho, foram coletados os dados de velocidade e direção do vento, fornecidos pela REDEMET, rede de monitoramento pertencente à Aeronáutica, cuja estação de Vitória/ES encontra-se no aeroporto de Vitória. Os dados de temperatura, umidade e precipitação foram coletados no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para a localidade de Vitória, cuja estação localiza-se na UFES.

Para avaliar as condições sinóticas atuantes na região durante o período amostrado, adicionalmente coletou-se as cartas sinóticas disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), para todos os dias do período amostrado. Além disso, também serviu como base para este estudo as sínteses sinóticas mensais dos meses de junho, agosto e setembro, disponibilizadas pelo CPTEC, que resumem os eventos sinóticos observados em cada mês do ano.

Primeiramente, apresentam-se os gráficos das variáveis temperatura, precipitação e umidade relativa para cada mês do período amostrado (Figura 25, Figura 26, Figura 27, e Figura 28). Adicionalmente, a Tabela 3 apresenta as médias mensais para temperatura e umidade e os acumulados por mês para precipitação, além das

normais climatológicas da cidade de Vitória para o período, disponibilizadas pelo INMET.

Através da evolução temporal da temperatura e umidade, durante o período de inverno, foram observadas variações durante todo o período, com a média horária da temperatura variando entre 33,1°C no dia 22 de setembro e 13,6°C no dia 03 de agosto, e umidade variando de 100%, valor que ocorreu algumas vezes durante o período como nos dias 17 de junho e 14 de julho, a 31%, que ocorreu no dia 01 de agosto. Com a análise da Tabela 3, pode-se notar que a temperatura e a umidade relativa média resultaram em valores esperados para o período de inverno da Grande Vitória, de acordo com as normais climatológicas, com valores de 22,3°C e 78%, respectivamente.

Com relação à chuva, percebe-se que o mês de agosto foi o mês mais chuvoso do período, o que não era esperado, considerando que, historicamente, agosto é o mês mais seco do ano, conforme pode ser visto nas normais climatológicas já apresentadas. A quantidade acumulada de chuva de agosto foi de 95 mm, ultrapassando o valor esperado do período, de acordo com a normal climatológica, que é de 40 mm. O mês de julho foi o segundo mais chuvoso, com precipitação acumulada de 70,6 mm, valor um pouco abaixo do esperado para o mês. Os meses de junho e setembro apresentaram precipitação bem abaixo da normal climatológica. De uma maneira geral, o inverno de 2013 foi atípico em relação à precipitação, sendo mais seco do que o esperado, porém com o mês de agosto, historicamente o mês mais seco do ano, sendo o mais chuvoso do período apresentando aproximadamente o dobro da precipitação esperada. Estes padrões mensais das condições meteorológicas observados irão refletir nas concentrações de $MP_{2,5}$ coletadas na RGV, que serão apresentadas no próximo capítulo.

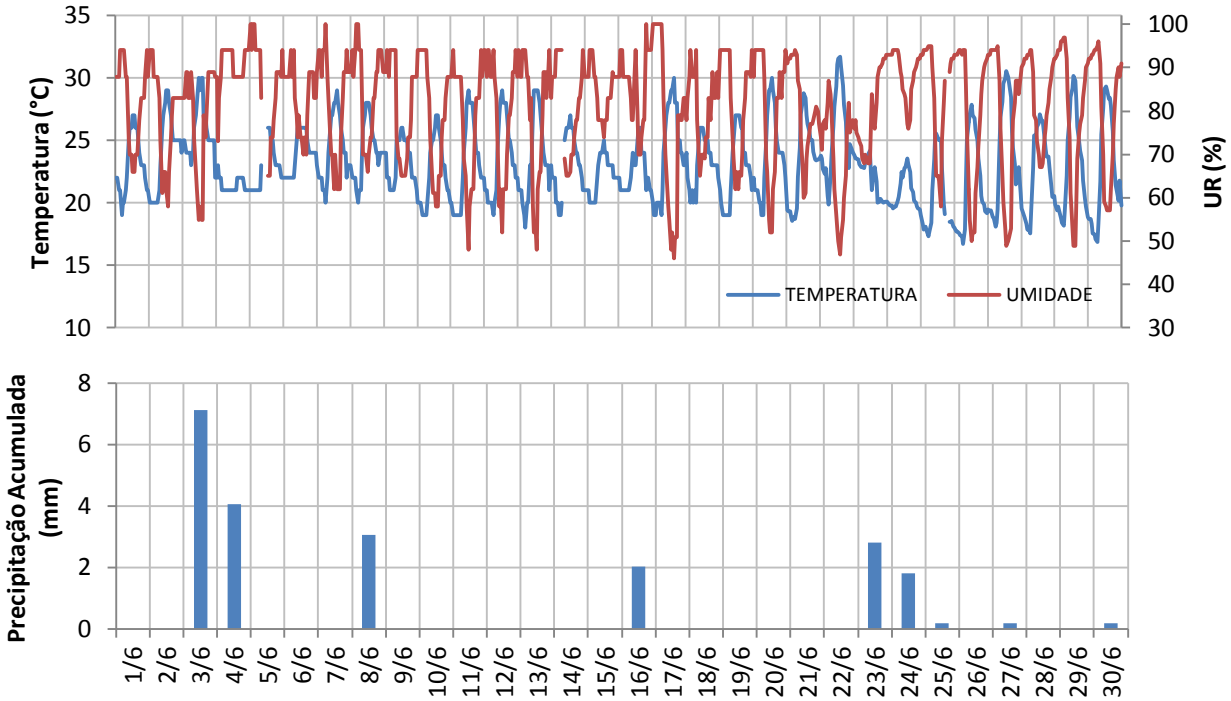


Figura 25. Temperatura, umidade relativa (horárias) e precipitação acumulada (diária) do mês de junho de 2013.

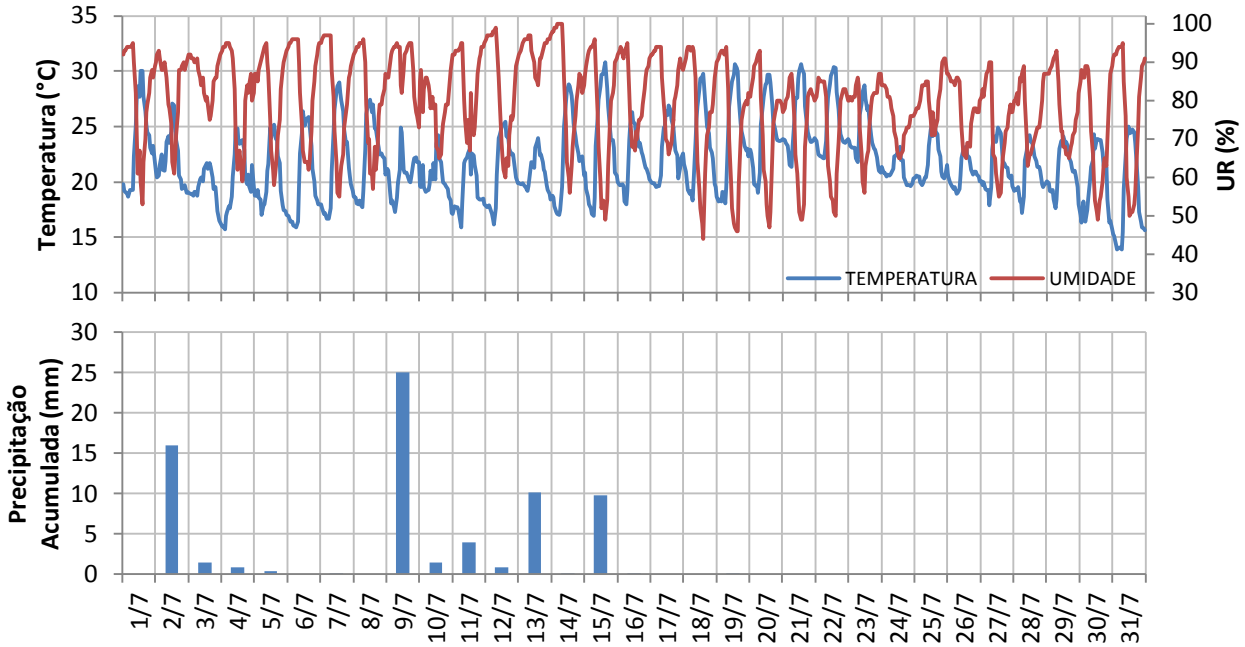


Figura 26. Temperatura, umidade relativa (horárias) e precipitação acumulada (diária) do mês de julho de 2013.

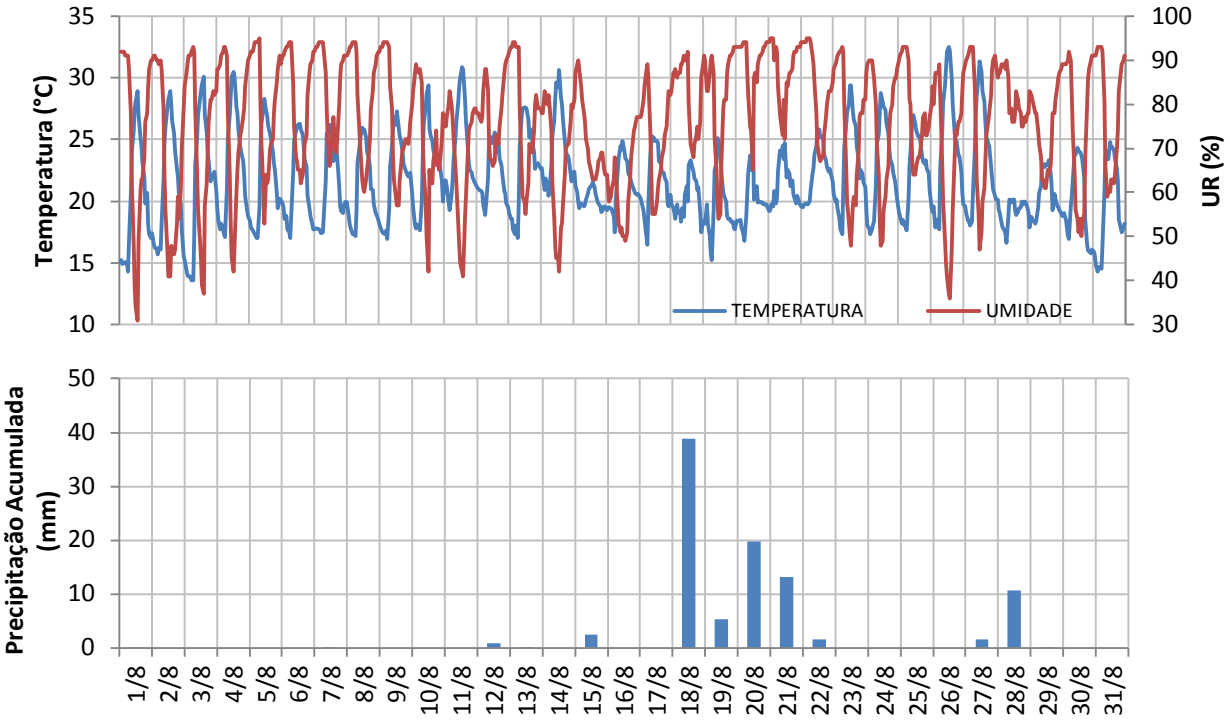


Figura 27. Temperatura, umidade relativa (horárias) e precipitação (diária) do mês de agosto.

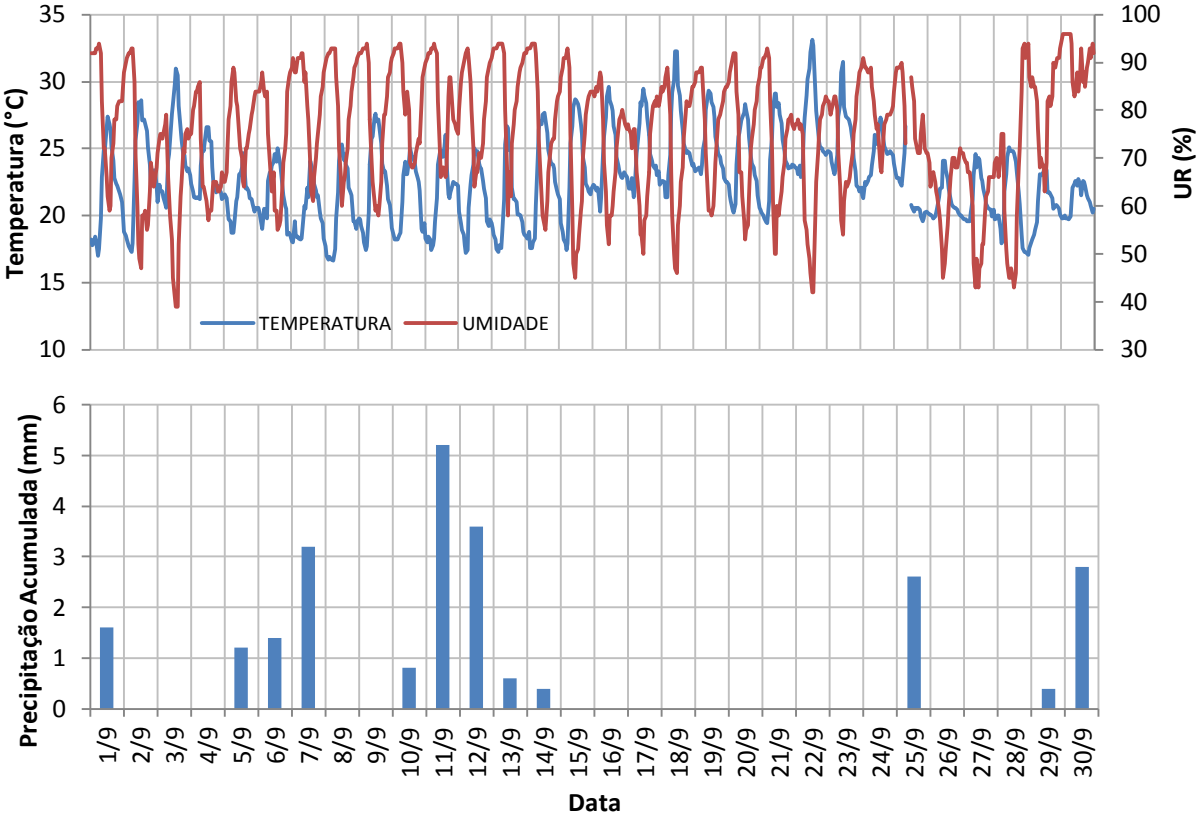


Figura 28. Temperatura, umidade relativa (horárias) e precipitação acumulada (diária) do mês de setembro.

Tabela 3. Temperatura e umidade médias e precipitação acumulada para cada mês do período, além das normais climatológicas de cada mês .

	Temperatura média (°C)		Umidade média (%)		Precipitação acumulada (mm)	
	Período	Normal Climatológica	Período	Normal Climatológica	Período	Normal Climatológica
Junho	23,09	22,30	81,39	77,00	21,45	65,00
Julho	21,80	21,60	79,91	77,00	70,60	85,00
Agosto	21,70	22,20	76,40	76,00	95,00	40,00
Setembro	22,74	22,90	75,50	77,00	23,80	90,00
TOTAL	**22,33**	**22,25**	**78,3**	**76,75**	**∑=210,85**	**∑=280,00**

Para análise geral da velocidade e direção do vento durante o período, foram realizadas as rosas dos ventos para cada mês, além da rosa do vento do período completo, apresentadas na Figura 29. Pode-se observar, pela análise das rosas dos ventos, que as direções predominantes do vento para os primeiros dois meses do inverno, Junho e Julho, apresentaram direções predominantes de N-NW, S-SW-SE, com as velocidades mais altas oriundas principalmente das direções SW e N. O mês de agosto apresentou esta mesma configuração, porém com velocidades maiores do que as dos meses anteriores, o que já era esperado devido este ter sido o mês mais chuvoso do período estudado. Setembro é um mês de transição, logo apresentou um aumento na frequência de ocorrência de ventos predominantes na direção NE, o que provavelmente será a direção predominante durante o resto do ano. As ocorrências de ventos do quadrante sul/sudoeste estão relacionadas com eventos de frentes frias, como será explicado mais adiante.

Lembrando que um dos principais sistemas de circulação atmosférica que atuam na região e influencia diretamente na direção e velocidade do vento, é a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que é uma massa tropical marítima, que apresenta temperaturas elevadas, resultantes da intensa radiação solar característica das latitudes tropicais, além de alta umidade, por causa da intensa evaporação marítima. A circulação atmosférica anticiclônica associada a este sistema, sobre a região, é predominantemente dos quadrantes Norte e Leste (CAVALCANTI *et al,* 2009).

No inverno, o anticiclone se desloca do oceano Atlântico Leste para próximo do continente, na porção Sudoeste do Atlântico, podendo inibir a passagem dos sistemas frontais, propiciando uma atmosfera estável, com ventos calmos, muitas vezes acompanhados de inversão térmica.

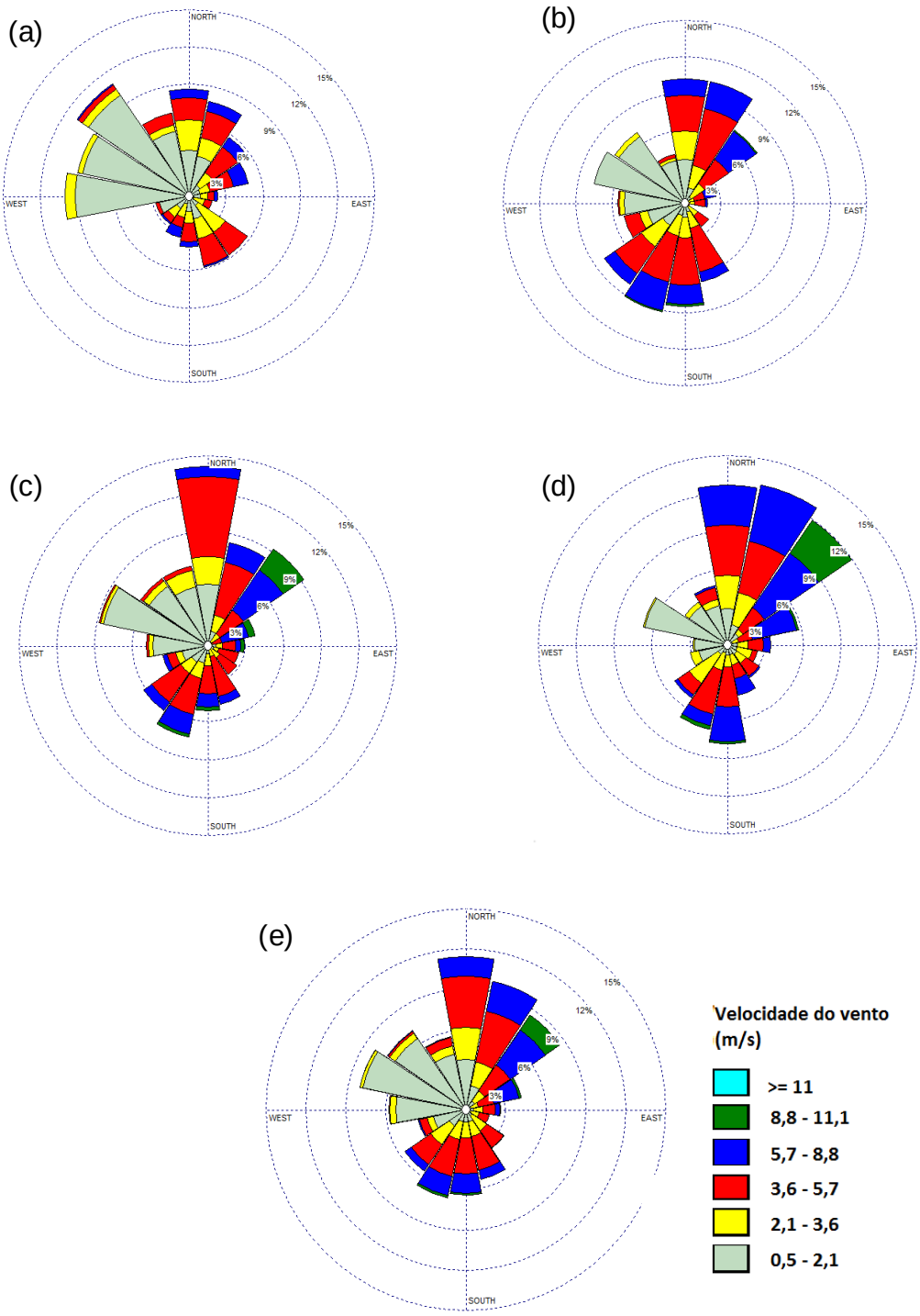


Figura 29. Rosas dos ventos de junho (a), julho (b), agosto (c), setembro (d) e do período completo (e).

Adicionalmente, a distribuição de frequência de velocidade dos ventos do período completo amostrado encontra-se na Figura 30. Com a análise do gráfico, nota-se que a faixa de velocidade mais recorrente do período foi 0,5 a 2,1 m/s, ocorrendo em 40,2% do tempo, seguida da faixa de 3,6 a 5,7 m/s, que ocorreu em 25,6% do tempo. De acordo com a escala de Beaufort, que classifica a intensidade dos ventos, na maior parte do tempo os ventos da região no período de estudo podem ser classificados como aragem (0,3 a 1,5 m/s), brisa leve (1,6 a 3,3 m/s) ou brisa fraca (3,4 a 5,4 m/s), com alguns eventos de brisa moderada (5,5 a 7,9 m/s) e forte (8 a 10,7 m/s).

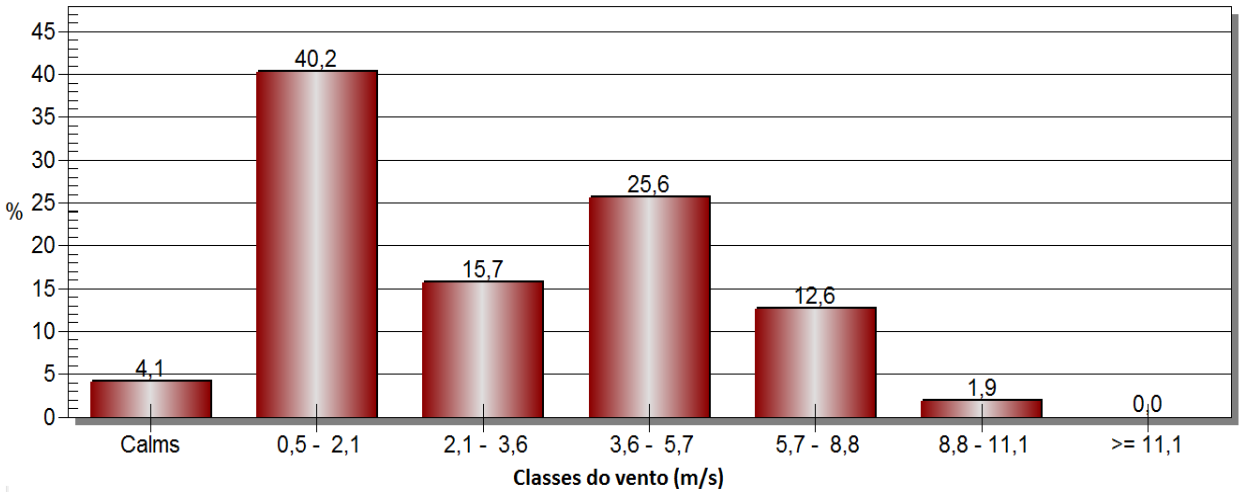


Figura 30. Distribuição de frequência dos ventos de acordo com a velocidade para o período completo.

Em relação aos sistemas sinóticos atuantes na região, de acordo com as sínteses sinóticas disponibilizadas pelo CPTEC, um total de 7 frentes frias (FF) chegaram à RGV durante o inverno de 2013. No mês de junho houve a incidência de apenas uma frente fria, no dia 23. No mês de julho houve duas frentes frias, a primeira no dia 09 e a segunda no dia 24 para o dia 25. Em agosto, duas FF incidiram sobre a região, a primeira no dia 15 e a segunda no dia 27 para o dia 28. No mês de setembro também houve a incidência de duas frentes frias, a primeira no dia 05 e a segunda no dia 25 para 26.

A Figura 31 mostra a influência das FF na temperatura e na precipitação, indicando com as letras “FF” os dias que ocorreram frentes frias. Pode-se observar que em todas as ocorrências de FF houve queda de temperatura em relação ao dia

anterior, e na maioria das incidências ocorreu chuva, com exceção da frente do dia 24 para o dia 25 de julho. As chuvas que ocorreram sem a incidência de uma frente fria, provavelmente foram causadas pela influência da circulação local, como as brisas marítimas e terrestres (FREITAS *et al*, 2007), como as do início do mês de junho e nos dias 20 a 22 de agosto, dias em que a região encontrava-se sob a influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

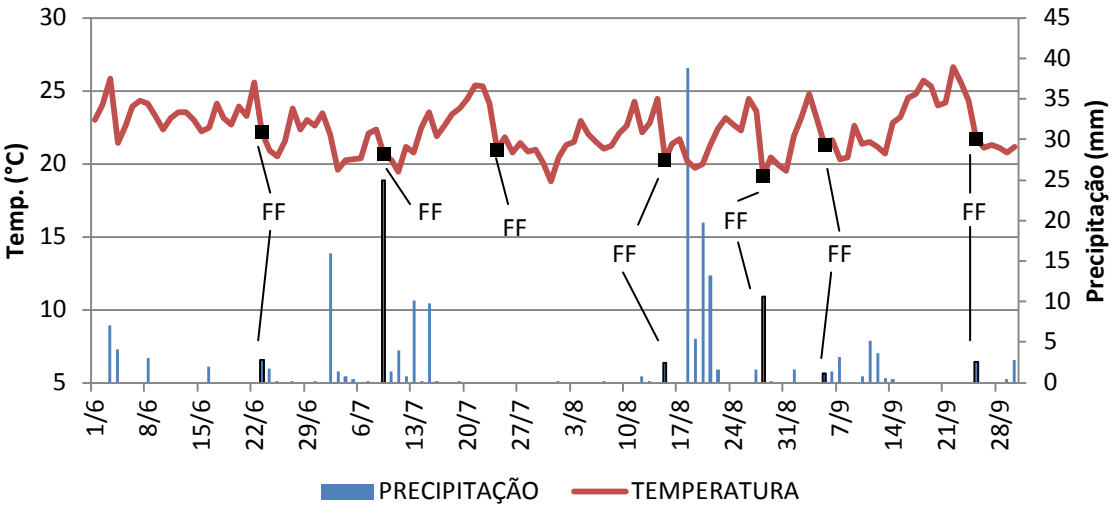


Figura 31. Temperatura média e precipitação do período, com as letras FF indicando as incidências de frente frias.

A Figura 32 mostra a velocidade do vento no período, com letras “FF” indicando as incidências de frentes frias. Além disso, a Figura 33 representa a direção média do vento nos dias próximos às frentes frias, por meio de setas que apontam a direção de onde o vento soprou predominantemente naquele dia. Com a análise da Figura 32 e da Figura 33, é possível observar que, na ocorrência de frentes frias, a velocidade do vento aumenta em relação ao dia anterior, o que contribui para o transporte e diluição de poluentes. Além disso, nos eventos de FF, é possível observar a mudança na direção do vento, que passa a soprar predominantemente do sul e sudoeste. Esta condição de vento sul-sudoeste irá amenizar os efeitos de transporte de poluentes do complexo industrial de Tubarão para a cidade de Vitória, sendo estes poluentes transportados para a região ao Norte das grandes empresas.

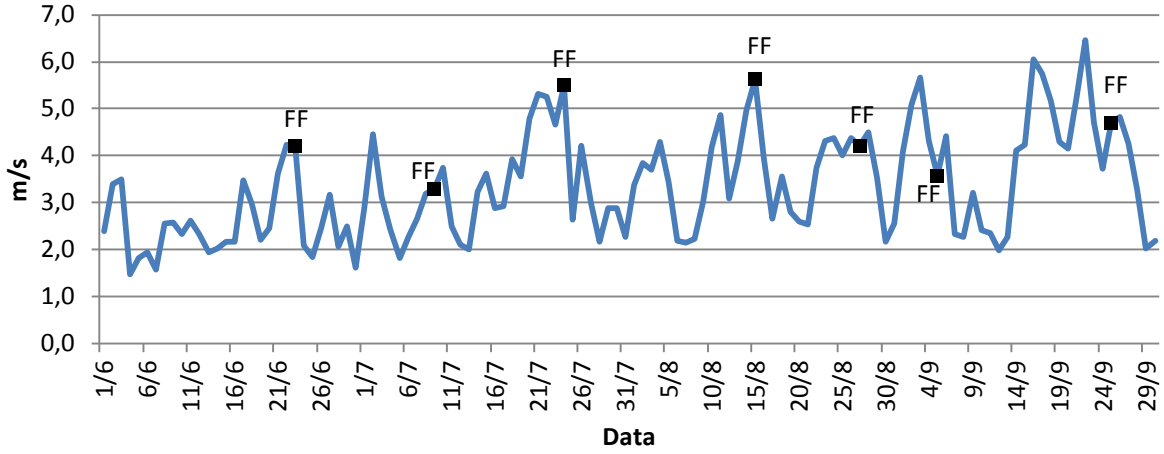
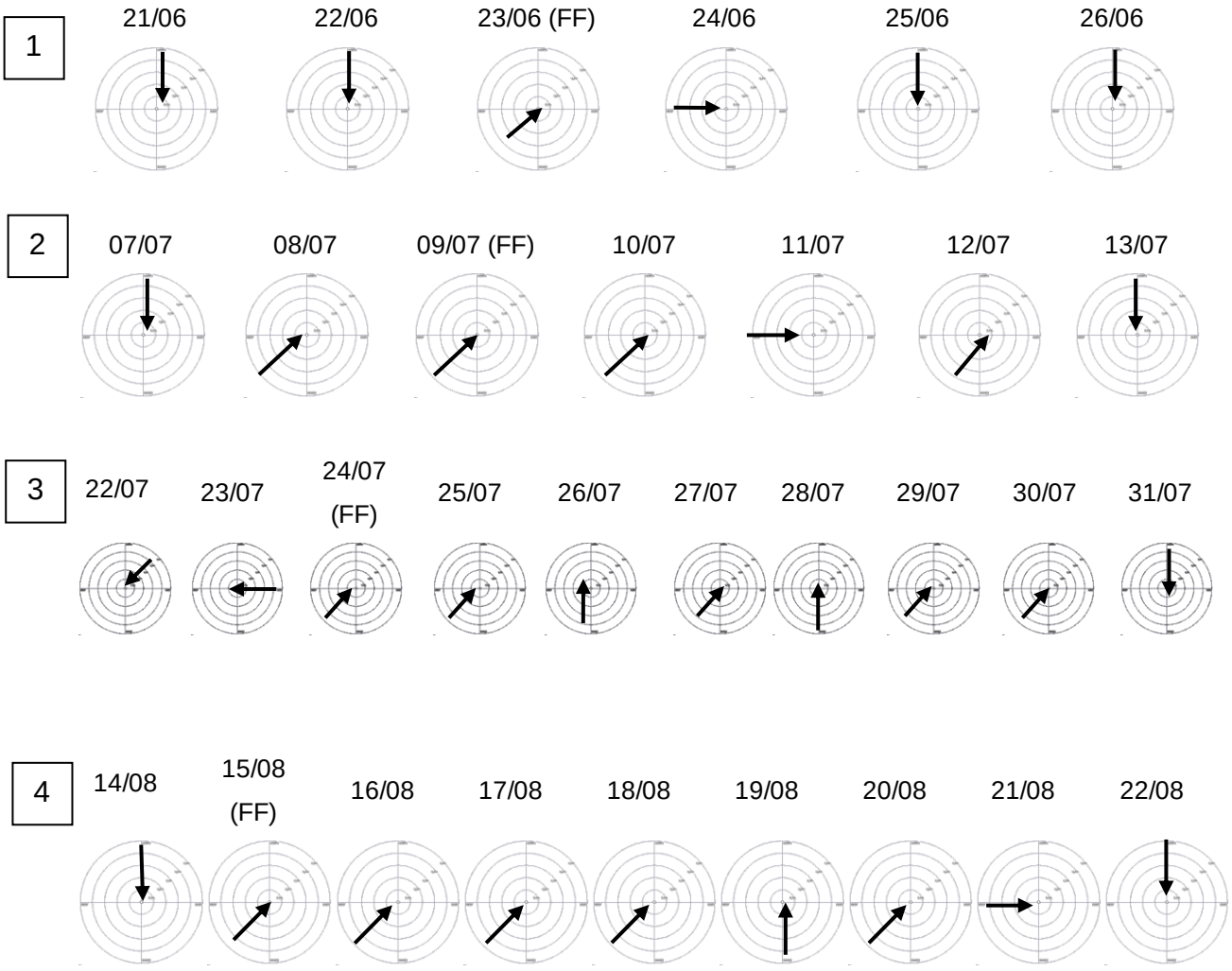


Figura 32. Velocidade do vento média diária do período estudado, com setas indicando a incidência de frentes frias.



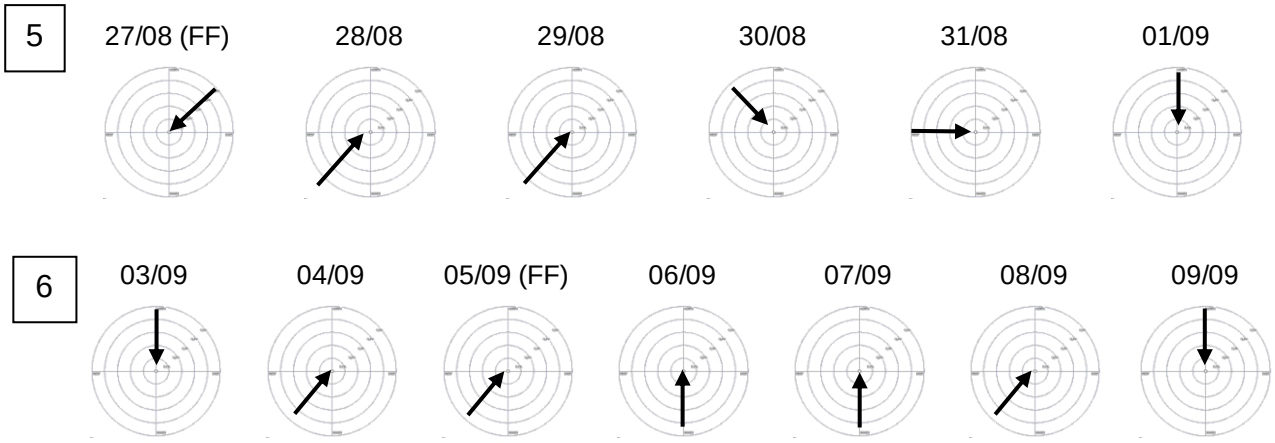


Figura 33. Representação da direção média diária do vento de 6 das 7 frentes frias (FF) que incidiram sobre a região, com setas apontando para onde o vento predominantemente soprou no dia. Os dias representados são os dias anteriores e posteriores às frentes frias. Obs.: a FF do dia 25 de setembro não foi representada pois este dia não faz parte do período de monitoramento de material particulado deste estudo.

Durante o inverno, as temperaturas são menores sobre os continentes, em consequência a Alta Subtropical do Atlântico Sul migra do Oceano Atlântico Central para o continente e Oceano Atlântico Oeste (BASTOS e FERREIRA, 2000). Esse comportamento pode ser observado nas cartas sinóticas, como a apresentada na Figura 34, do dia 31 de julho, quando um centro de alta pressão estava atuando sobre o Espírito Santo. Os centros de alta pressão são caracterizados por condições de tempo estável, com velocidade do vento fraca, o que dificulta a dispersão dos poluentes. Assim, no inverno, as frentes frias tem importante papel na dispersão, pois aumentam a velocidade do vento, aumentando o transporte, e ainda podem causar chuvas, que lavam a atmosfera, reduzindo a concentração dos poluentes.

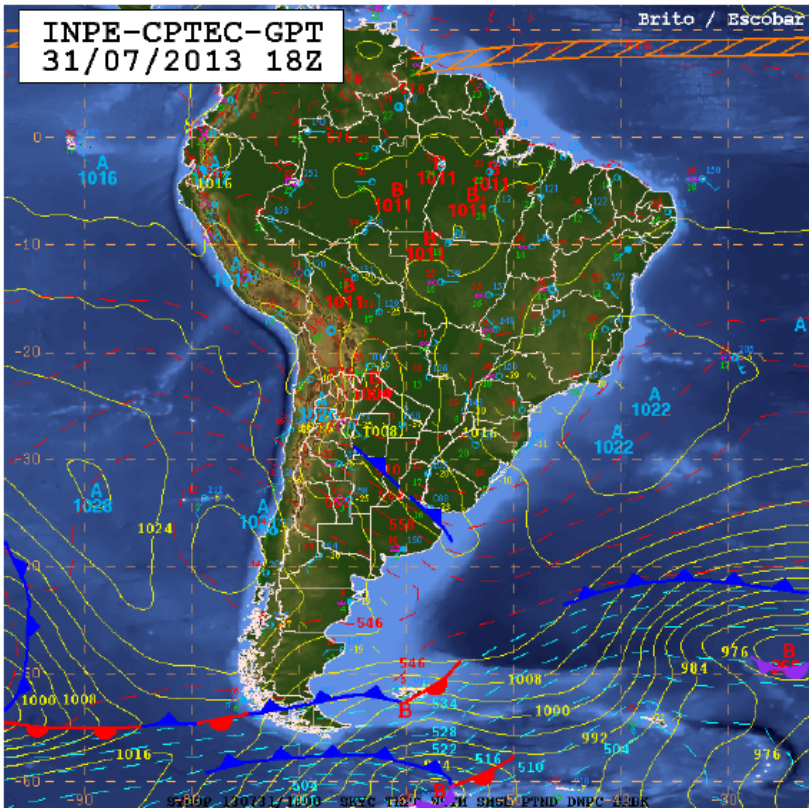


Figura 34. Carta sinótica do dia 31 de julho. Nota-se a presença de um anticiclone atuando sobre o ES (indicado pelo contorno amarelo e um A azul) (Fonte: CPTEC).

6.2. Análise gravimétrica do $MP_{2,5}$

O material particulado fino, ou seja, com diâmetro menor que 2,5 µm, tem grande influência da vida humana em diversos aspectos, principalmente na saúde, pois tem a capacidade de penetrar profundamente no trato respiratório e causar doenças como asma, bronquite, podendo causar irritação nos olhos e na garganta e transportar para a corrente sanguínea substâncias tóxicas e cancerígenas (IEMA, 2007). Essa situação é agravada em períodos críticos de dispersão de poluentes, como no inverno, quando há altas pressões estacionárias sobre o continente que inibem a dispersão vertical, reduzem a velocidade do vento e aumentam as horas de calmaria, provocando um aumento na concentração de poluentes.

Em vista disso, este estudo verificou os níveis de concentração de $MP_{2,5}$ na região da Grande Vitória no período do inverno de 2013, analisando a concentração média de 24h de dias alternados, e os resultados estão apresentados neste tópico.

A Tabela 4 apresenta uma análise estatística para os valores de concentração de material particulado fino ($MP_{2,5}$) encontrados durante o período de amostragem, apresentando a média da concentração para cada local considerando todo o período amostrado, os valores máximos e mínimos para cada localidade, o desvio padrão das amostras (dado importante para avaliar a variação dos valores para um mesmo ponto), além da quantidade de amostras válidas.

Analisando os dados da Tabela 4, pode-se perceber que a localidade com a maior concentração média de particulado fino é Jardim Camburi, com média de 14,63 µg/m³, seguido de Cariacica, Laranjeiras, Ibes, Vitória Centro e Enseada do Suá. Além disso, a maior concentração de $MP_{2,5}$ encontrada durante todo o período de amostragem foi de 29,35 µg/m³, também na localidade de Jardim Camburi, e a mínima foi encontrada no Ibes, com o valor de 3,13 µg/m³.

O Apêndice 1 apresenta todos os valores de concentração de $MP_{2,5}$ obtidos, com seus respectivos erros.

Analisando aos dois locais que apresentaram as maiores médias do período completo, Jardim Camburi e Cariacica, pode-se observar que ambos possuem características próprias, como fontes posicionadas muito próximas do local de amostragem que podem ter influenciado diretamente os valores de concentração de $MP_{2,5}$. Em Jardim Camburi, observa-se a presença de uma churrascaria ao lado do local de amostragem, como pode ser observado na Figura 35, que contribuiu para o aumento da concentração de $MP_{2,5}$ no ponto. O ponto de amostragem de Cariacica fica localizado dentro da Ceasa, localizada no encontro entre a BR-101 e a BR-262, rodovias que possuem alto tráfego de veículos pesados, como caminhões e carretas que, assim como as próprias rodovias, contribuem no aumento da concentração de $MP_{2,5}$.

Tabela 4. Concentrações médias, máximas e mínimas e desvio padrão dos dados para cada localidade estudada.

Localidade	Nº de amostras	Média (µg/m³)	Máximo (µg/m³)	Mínimo (µg/m³)	Desvio Padrão
Laranjeiras	47	11,98	19,39 ± 3,05	5,27 ± 1,81	3,69
J. Camburi	42	**14,36**	**29,35** ± 2,22	6,14 ± 3,05	5,11
Enseada do Suá	47	9,70	19,25 ± 1,25	4,84 ± 1,81	3,26
Vitória Centro	46	10,17	21,48 ± 3,19	3,30 ± 3,05	4,23
Ibes	46	10,41	22,26 ± 0,83	**3,13** ± 0,83	4,84
Cariacica	47	12,16	27,99 ± 3,19	4,87 ± 2,22	5,20

Figura 35. Chaminés de uma churrascaria ao lado do local de amostragem em Jardim Camburi. O local de amostragem está indicado com um círculo vermelho.

A Figura 36 apresenta um gráfico com as máximas concentrações médias de 24 horas encontradas em cada localidade e a indicação do valor máximo recomendado pela OMS para a concentração de $MP_{2,5}$. Pode-se notar que apenas as localidades de Jardim Camburi e Cariacica ultrapassaram o valor recomendado de 25 µg/m³. Nessas localidades, esse valor foi ultrapassado apenas uma vez durante o estudo, ou seja, em todo o período estudado, para todas as localidades, a concentração limite recomendada pela OMS foi ultrapassada apenas 2 vezes. A primeira ocorrência foi em Cariacica (27,99 µg/m³), no dia 31 de julho, e a segunda

em Jardim Camburi (29,35 µg/m³), no dia 13 de setembro. Nestes dias, a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) estava atuando sobre o ES, como pode ser observado na Figura 34, já apresentada anteriormente, referente ao dia 31/7. Esta situação, que resulta em ventos fracos e tempo estável, somada aos fatores característicos de cada local, como fontes pontuais próximas e fontes móveis influentes, causaram as máximas concentrações nestes locais.

Pode-se observar na Figura 36 que, apesar de as outras localidades não terem ultrapassado o padrão OMS, todas alcançaram concentrações próximas a 20 µg/m³. Este resultado comprova a importância de se monitorar as partículas finas na região e estabelecer padrões de qualidade do ar para as mesmas, visto seu impacto na saúde e no meio ambiente.

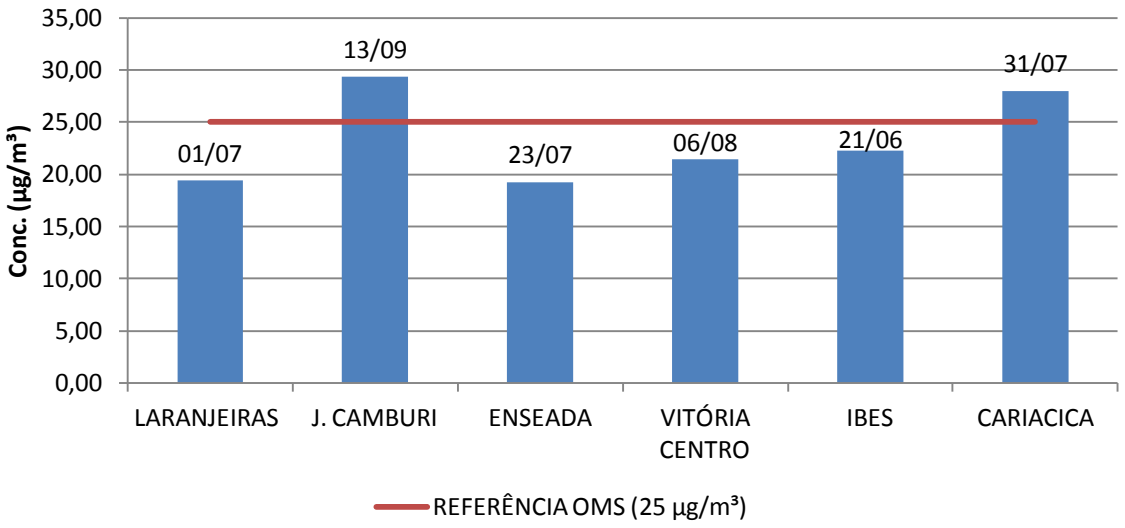


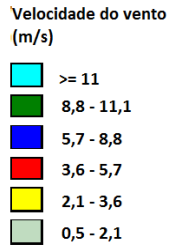
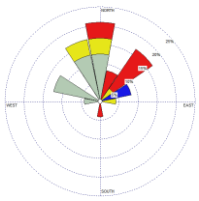
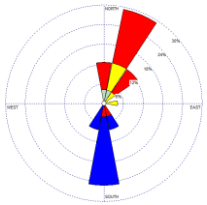
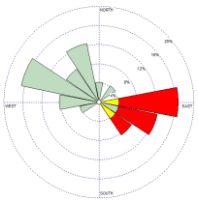
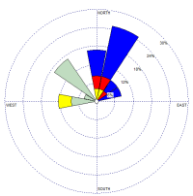
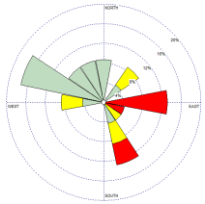
Figura 36. Concentrações máximas encontradas em cada localidade e a linha de indicação do limite recomendado pela OMS para $MP_{2,5}$ (25 µg/m³), além dos dias em que ocorreram essas concentrações.

A Tabela 5 apresenta algumas informações dos dias em que ocorreram as maiores concentrações nas seis localidades, salientando que os valores de precipitação acumulada foram fornecidos pelo INMET e os valores de velocidade e direção dos ventos são dados da REDEMET do Aeroporto de Vitória. Não houve precipitação em nenhum dos dias, com exceção do dia 13/9 na estação de Jardim Camburi, onde houve um volume de chuva de 0,6 mm, causada por fenômenos atmosféricos

de mesoescala (brisa marítima-terrestre), conforme pode ser verificado pela variação da direção do vento predominante ao longo do dia (NW-N-NE).

Exceto nos dias 23 e 31/7, todos os dias possuíram direção predominante do vento variando entre NW-N-NE. O dia 23/7, dia de maior concentração na Enseada do Suá, teve contribuições de vento sul ao final do dia, devido à chegada da frente fria do dia 24 de julho. Em geral, a velocidade do vento encontrava-se baixa nestes dias, característica da ASAS, que predominou sobre a região na maioria destes dias, mas pode-se destacar o dia de máxima concentração na Enseada do Suá, em que a velocidade do vento média do dia foi de 4,7 m/s. Este fato, somado aos ventos vindos do NE e nenhuma ocorrência de calmaria, indica uma possível contribuição das indústrias localizadas a nordeste do ponto na concentração de material particulado fino neste ponto.

Tabela 5. Informações meteorológicas dos dias de maior concentração em cada localidade.

	Laranjeiras	Jardim Camburi	Enseada do Suá	Vitória Centro	Ibes	Cariacica
Dia de concen-tração máxima	01/07	13/09	23/07	06/08	21/06	31/07
Concentração	19,39 µg/m³	29,35 µg/m³	19,25 µg/m³	21,48 µg/m³	22,26 µg/m³	27,99 µg/m³
Velocidade média do vento	2,9 m/s	2,3 m/s	4,7 m/s	2,2 m/s	3,6 m/s	2,3 m/s
Precipitação	0 mm	0,6 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Rosa dos ventos						
Calmarias	3,57 %	3,57 %	0,0 %	3,57 %	7,14 %	3,7 %

Os gráficos a seguir, apresentados na Figura 37 e na Figura 38, apresentam a variação temporal da concentração de $MP_{2,5}$, com a indicação dos dias de incidência de frente frias (representadas pelas letras FF). Nota-se que, em geral, nos dias da incidência das FF as concentrações não diminuem, sofrendo queda no dia de medição após a chegada da frente fria. Isso ocorre pois o efeito da frente fria na concentração de material particulado não é verificado imediatamente no dia de incidência da FF, mas sim nos dias logo após a passagem da mesma, quando os ventos fortes e as chuvas associadas à FF já fizeram efeito na dispersão dos poluentes.

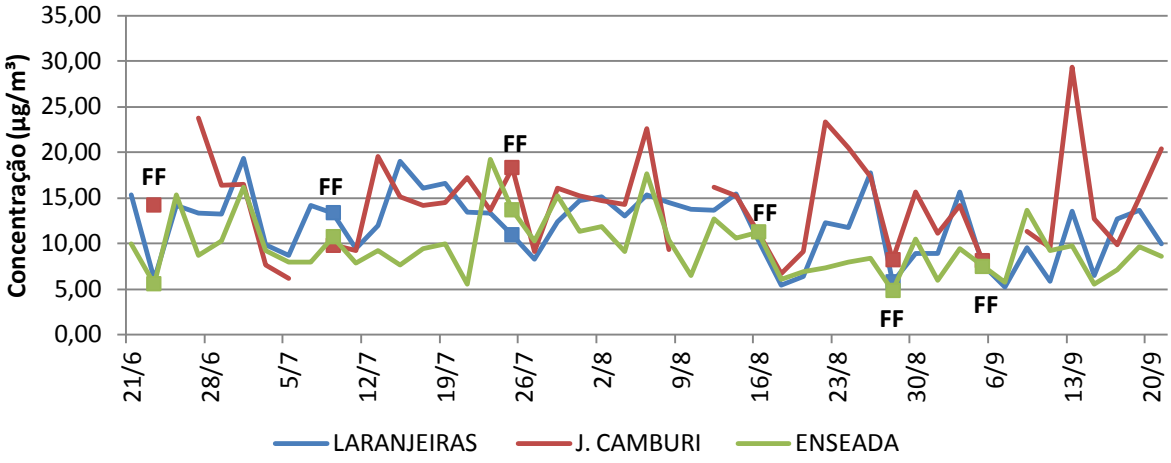


Figura 37. Variação da concentração de $MP_{2,5}$ durante o período amostrado para as localidades: Laranjeiras, Jardim Camburi e Enseada do Suá.

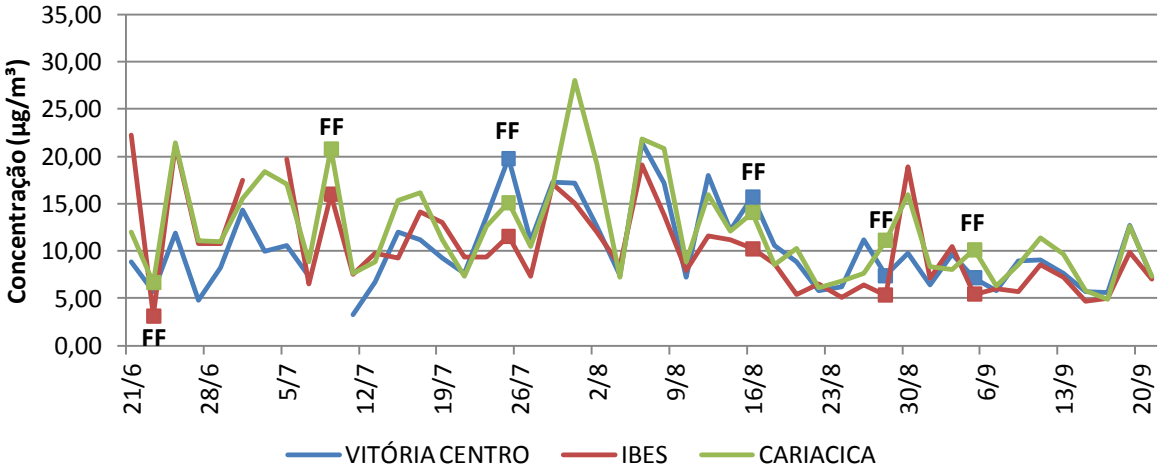


Figura 38. Variação da concentração de $MP_{2,5}$ durante o período amostrado para as localidades: Vitória Centro, Ibes e Cariacica.

A Figura 39 e a Figura 40 mostram os gráficos da variação das concentrações juntamente com a precipitação, para todo o período amostrado. É possível observar que, em todos os casos, as concentrações de $MP_{2,5}$ diminuíram, principalmente no período de 18 a 22 de agosto. Os outros períodos de chuva não reduziram significativamente as concentrações, pois o volume de água precipitado nessas ocasiões não foi significativo. De maneira geral, as chuvas causaram, ainda que de maneira pouco significativa em algumas ocasiões, a lavagem da atmosfera, diminuindo a concentração dos poluentes.

As chuvas dos dias 18 a 22 de agosto, as mais volumosas do período analisado, causaram queda nas concentrações de $MP_{2,5}$ para a maioria dos pontos amostrados, sendo possível observar uma redução de aproximadamente 10 µg/m³ na concentração de algumas localidades.

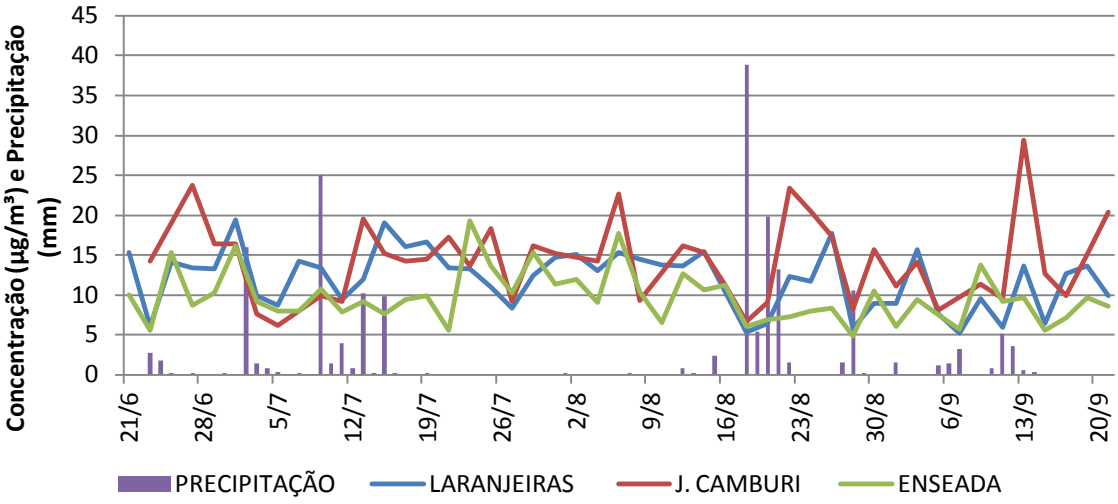


Figura 39. Variação das concentrações e da precipitação para o período amostrado, para as localidades de Laranjeiras, Jardim Camburi e Enseada do Suá.

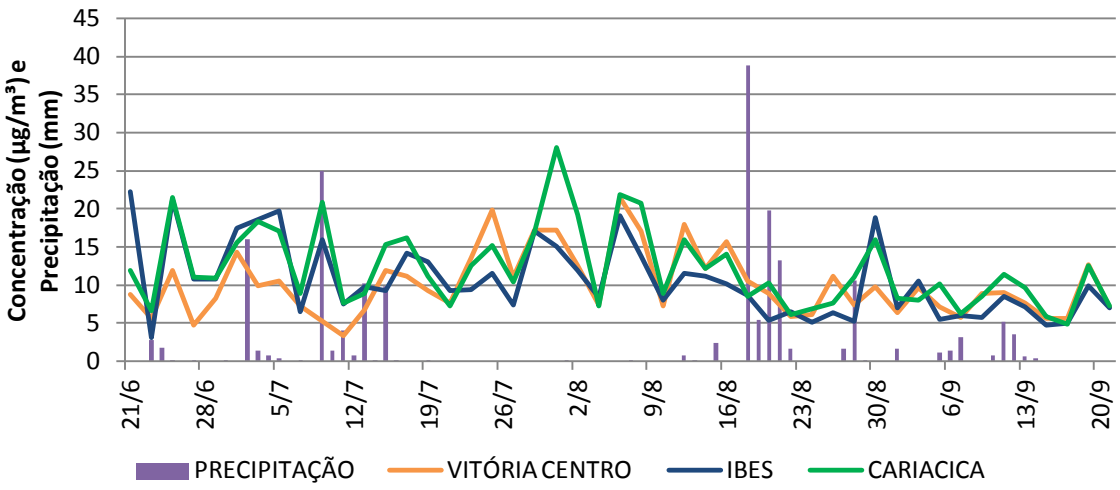


Figura 40. Variação das concentrações e da precipitação para o período amostrado, para as localidades de Vitória – Centro, Ibes e Cariacica.

A Figura 41 e a Figura 42 apresentam os gráficos de concentração de cada localidade e a velocidade do vento média de cada dia, para todo o período amostrado. Ao analisar os gráficos, pode-se observar que, em algumas localidades, como Laranjeiras e Jardim Camburi, a concentração é proporcional à velocidade do vento, ou seja, com o aumento da velocidade do vento há aumento na concentração. Isso mostra que a concentração de material particulado fino nestes lugares sofre influência da ressuspensão de partículas do solo, que é acentuada com altas velocidades do vento. Já em outros lugares, como Ibes e Cariacica, a concentração é, em geral, inversamente proporcional à velocidade do vento e, com o aumento da velocidade do vento, a concentração diminui, mostrando que nestes lugares o vento tem um importante papel de transporte e dispersão dos poluentes.

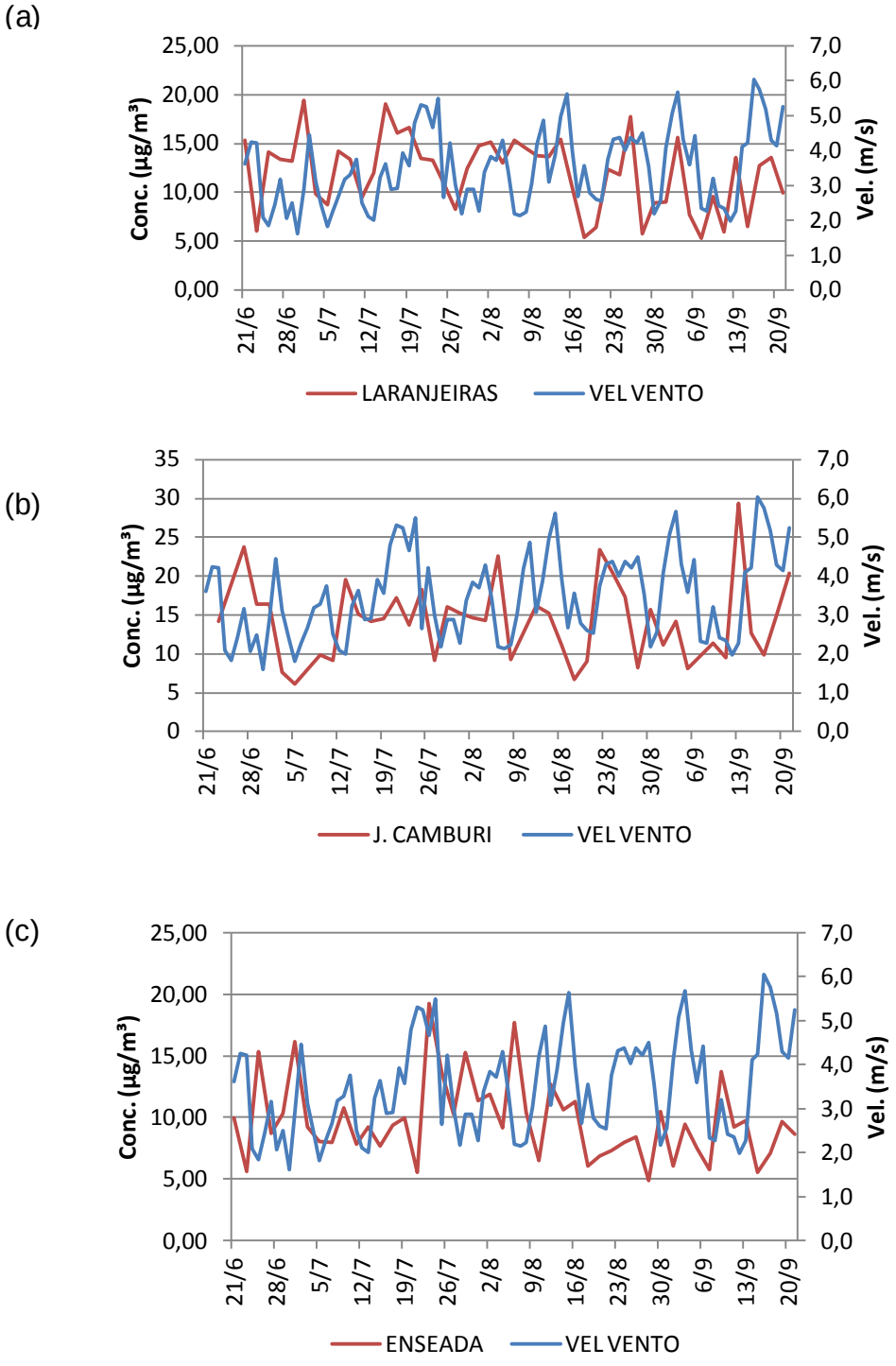


Figura 41. Concentração e velocidade do vento de todo o período amostrado para as localidades de Laranjeiras (a), Jardim Camburi (b) e Enseada do Suá (c).

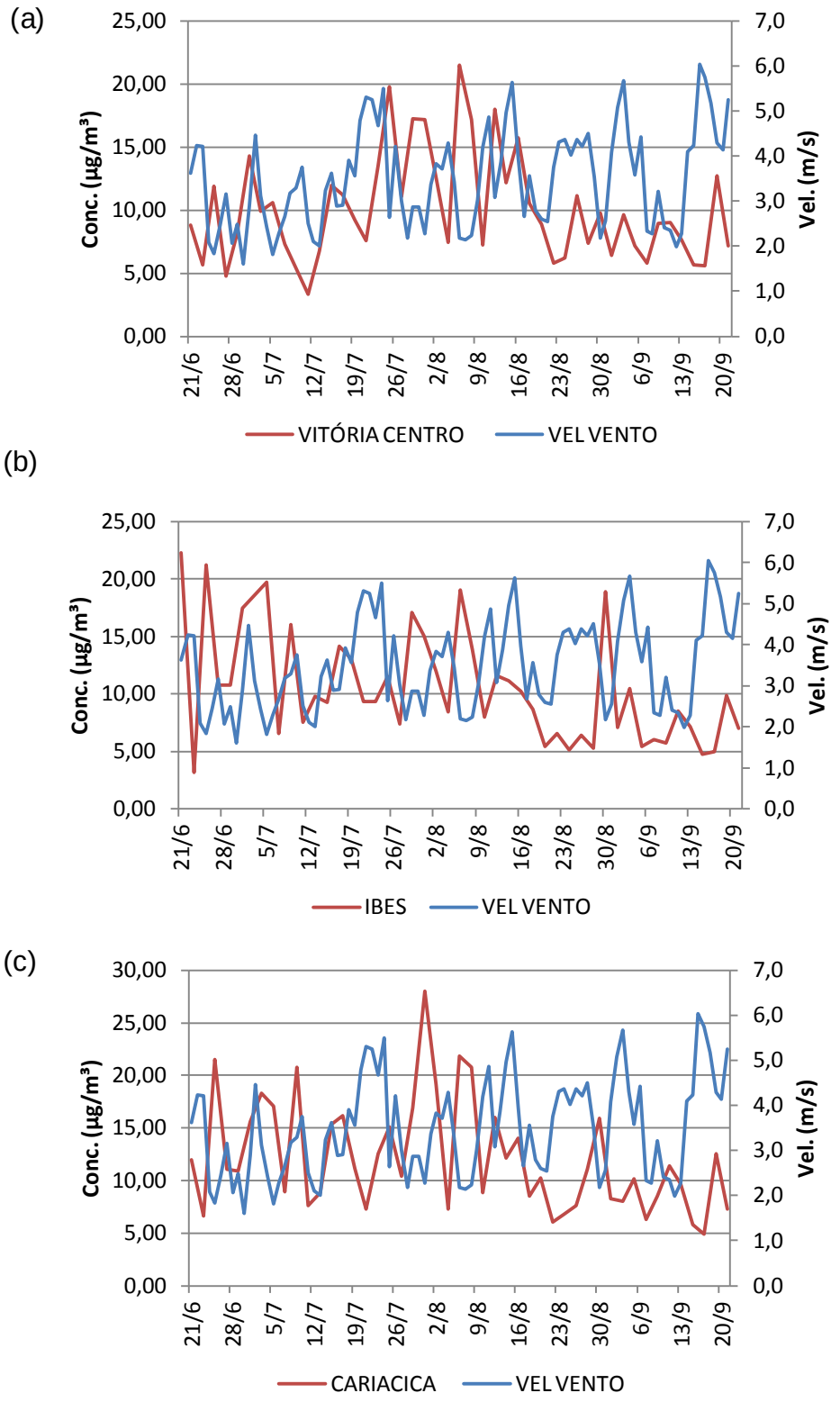


Figura 42. Concentração e velocidade do vento de todo o período amostrado para as localidades de Enseada do Suá (a), Vitória – Centro (b) e Cariacica (c).

6.3. Distribuição de tamanho em número

Por meio dos dados coletados pelo LAS, foi possível realizar a distribuição do número de partículas em função do diâmetro em uma escala temporal. Os dias amostrados pelo LAS foram de 07 de agosto a 02 de setembro, com exceção dos dias 16 e 17 de agosto, resultando em um total de 25 dias amostrados. É importante ressaltar que o equipamento esteve em operação dentro da UFES, *campus* Goiabeiras, mais precisamente no prédio da Engenharia Ambiental.

Primeiramente, foram elaborados dois gráficos que apresentam a variação do número de partículas por litro em função do seu diâmetro em uma média de 3 em 3 horas, considerando todo o período amostrado, apresentado na Figura 43 e na Figura 44. A Figura 43 é referente à distribuição em número por litro das partículas com diâmetros da moda fina, ou seja, com diâmetro menor que 2,5 µm, e a Figura 44 é referente às partículas da moda grossa, com diâmetro maior que 2,5 µm.

Percebe-se que a faixa de horário com a maior concentração em número de partículas da moda fina é das 18h às 20h, seguida das faixas 21h às 23h e 15h às 17h, que resultaram em concentrações médias próximas. Esses horários, principalmente das 17h às 21h, são caracterizados pelo tráfego intenso de veículos, o que ocasiona em um aumento do número de partículas na atmosfera, ultrapassando a média de 25 mil partículas por litro para a menor faixa de diâmetro analisada (0,25-0,28 µm). Vale lembrar que essa faixa de diâmetro é caracterizada como partículas finas, que causam sérios efeitos na saúde, como já ressaltado anteriormente.

A faixa de horário das 0h às 2h foi a quarta com maior média para a moda fina, seguida das faixas de 6h às 8h, 12h às 14h e 3h às 5h. A faixa de horário com a menor concentração em número das partículas é das 9h às 11h. O maior número de partículas no horário de 18h às 21h caracteriza bem o perfil da fonte de emissão das partículas finas da região que, provavelmente, é emissão veicular por queima dos combustíveis.

Analisando-se a Figura 44, que representa a distribuição de tamanho em número da moda grossa, pode-se perceber que, semelhantemente à moda fina, a faixa horária das 18h às 23h possui a maior concentração em número por litro. A faixa de horário da madrugada, ou seja, das 0h às 2h e das 3h às 5h, possui relativamente maior concentração em número na moda grossa que na moda fina, em relação às outras faixas de horário. Na moda fina, essas faixas de horário são a quarta e sétima mais numerosas, respectivamente, sendo na moda grossa a terceira e quinta mais numerosas. Esse resultado indica que as partículas noturnas possuem menos partículas finas que os outros horários, porém maior número de partículas da moda grossa que as outras faixas de horário. Esse crescimento em relação aos outros horários está associado com o aumento da umidade relativa, podendo ser este efeito ampliado, quando associado à evolução da camada limite noturna estável próxima da superfície, confinando assim os poluentes na baixa atmosfera e aumentando a probabilidade de crescimento das partículas por coagulação (ALBUQUERQUE, 2005).

Além disso, com a análise das figuras, pode-se observar que as partículas finas (com diâmetro menor que 2,5 µm) são as que se apresentam em maior número na atmosfera, padrão já citado na literatura.

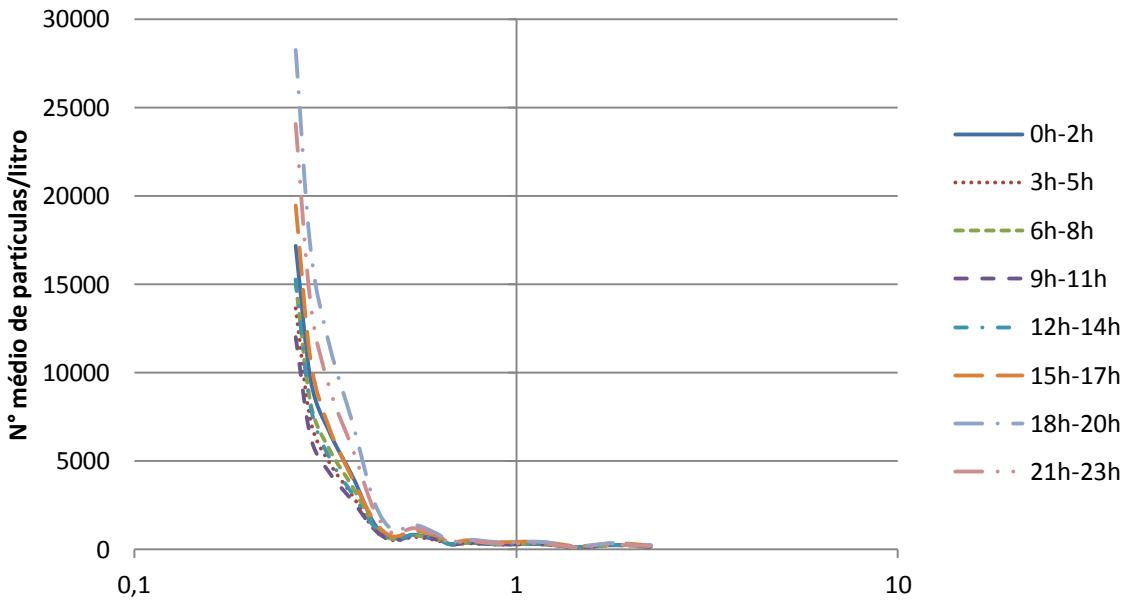


Figura 43. Distribuição de tamanho em número em função do diâmetro para as partículas da moda fina (d_a <2,5 µm), com médias a cada 3 horas.

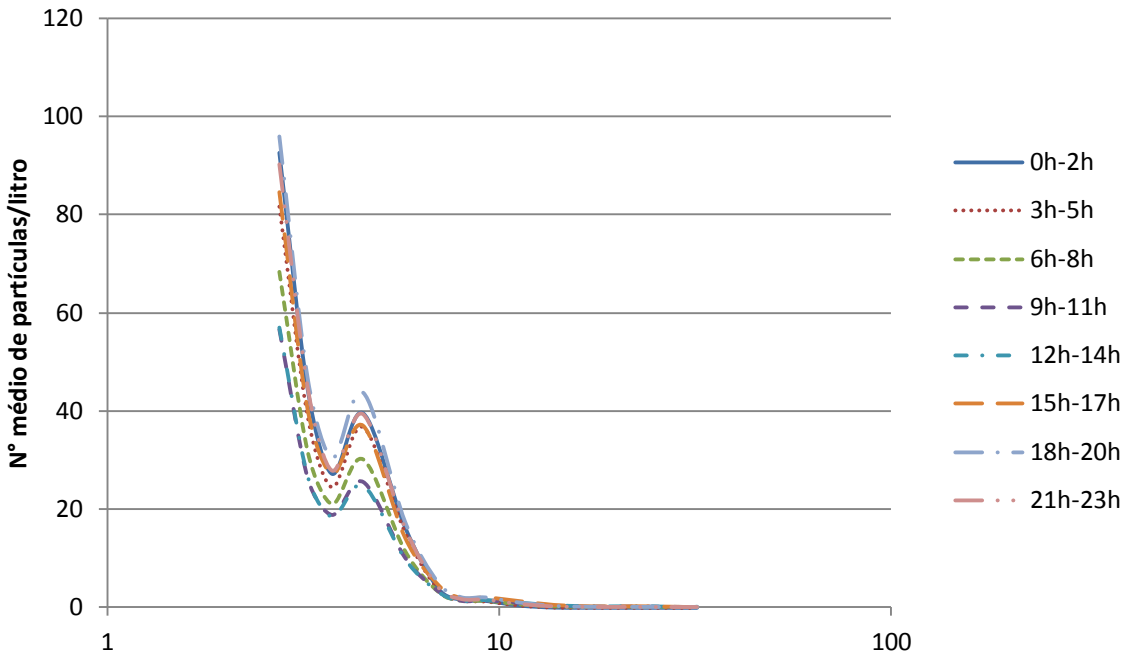


Figura 44. Distribuição de tamanho em número em função do diâmetro para as partículas da moda grossa (d_a >2,5 µm), com médias a cada 3 horas.

A Figura 45 apresenta a variação temporal do número total de partículas por litro durante todo período amostrado e a Figura 46 mostra a relação entre o número de partículas e a precipitação do período. A Figura 47, a Figura 48 e a Figura 49 apresentam a relação entre a concentração em número de partículas e a velocidade do vento, para todo o período amostrado, dividido em 3 gráficos para melhor visualização. Analisando as Figuras 45 a 49 em conjunto, pode-se observar que no início do período amostrado, o número total de partículas por hora encontrava-se em torno de 3 milhões, aumentando a partir do dia 12/8 (segunda-feira). O primeiro grande pico de concentração do período amostrado ocorre no dia 07/8, às 19h, ocasionado pela combinação de baixa velocidade do vento (Figura 47) e horário de intenso tráfego de veículos. Em geral, pode-se afirmar que os picos de concentração verificados em todo o período estão relacionados à faixa de horário de alto fluxo de veículos (17h às 22h) e algumas vezes a baixas velocidades do vento.

No dia 15, quando houve a incidência de uma frente fria na região, a velocidade do vento sofreu um leve aumento e houve ocorrência de precipitação, diminuindo consideravelmente o número de partículas, principalmente no início do dia.

provavelmente devido ao aumento da velocidade do vento associada à frente fria, porém, sendo logo depois reduzido, pela influência da chuva. Esse resultado indica que o ponto amostrado provavelmente sofreu influência das partículas ressuspendidas do solo pela ação do vento, pois, nas duas ocorrências de frente frias do período houve maiores velocidades do vento e picos de concentração, como se pode observar na Figura 45.

Os dias 18 a 27 de agosto obtiveram baixas concentrações em número de partículas, devido à incidência de chuvas nesse período, que lavou a atmosfera e reduziu a concentração em número em relação ao período anterior, assim como aconteceu com a concentração em massa, já apresentada anteriormente. No dia 28/08 há a incidência de uma nova frente fria com incidência de chuvas, que causa redução no número de partículas. As concentrações mantêm-se baixas até o final do período de amostragem, com exceção do dia 31, onde há um pico de concentração, causado pela baixa velocidade do vento associada à ASAS atuante sobre a região neste dia.

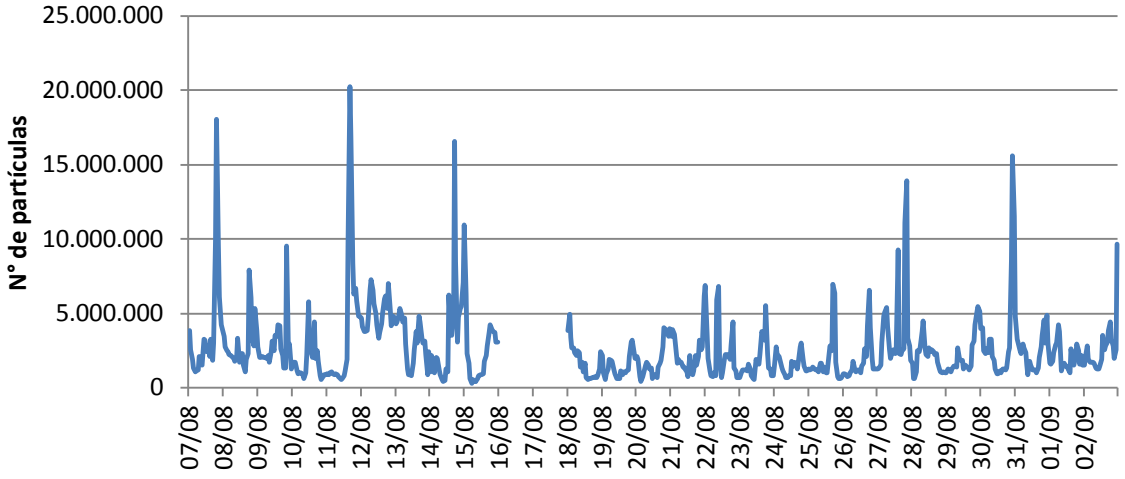


Figura 45. Número total de partículas por hora, para todo o período amostrado.

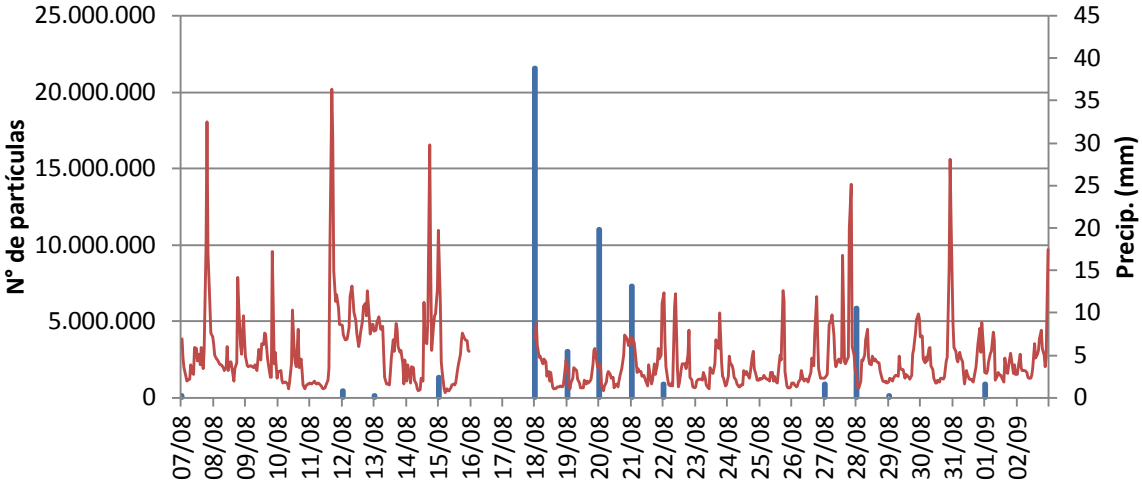


Figura 46. Número total de partículas por hora e precipitação diária, para todo o período amostrado.

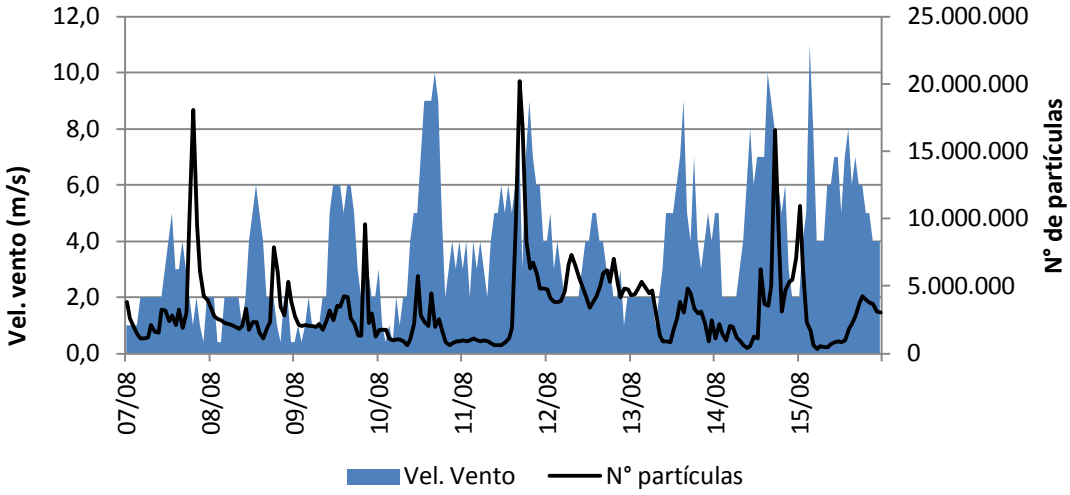


Figura 47. Número de partículas e velocidade do vento para o período de 07/08 a 15/08.

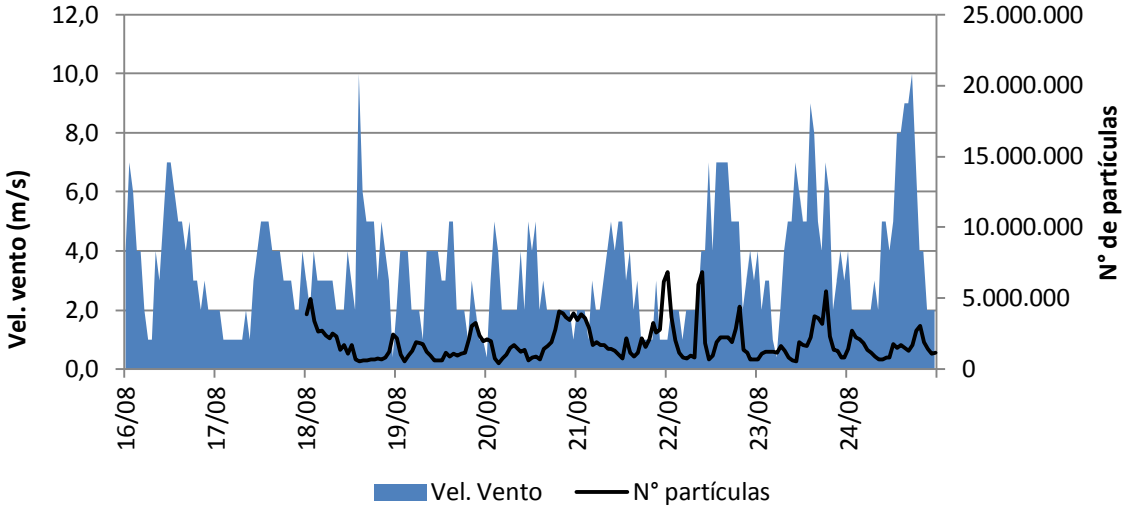


Figura 48. Número de partículas e velocidade do vento para o período de 16/08 a 24/08.

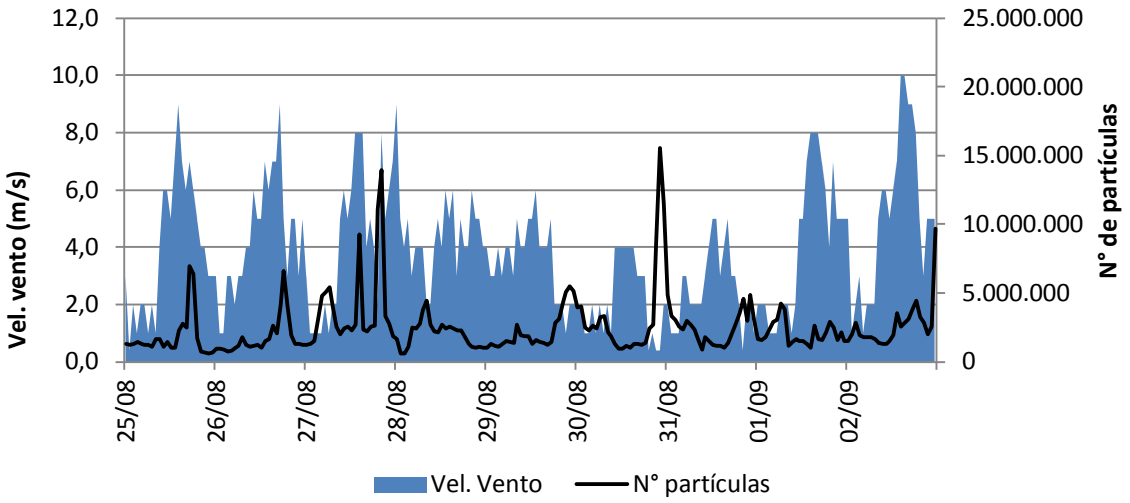


Figura 49. Número de partículas e velocidade do vento para o período de 25/08 a 02/09.

Os resultados obtidos pelo LAS também permitiram avaliar a diferença de número de partículas em suspensão na atmosfera em relação aos dias da semana. Pode-se observar que, em geral, os dias de final de semana possuem menor concentração de partículas em número se comparados com dias de semana. Além disso, os horários de maior de concentração mudam da faixa das 18h às 23h dos dias de semana para a parte da tarde nos finais de semana, entre os horários de 15h às 17h, como pode ser observado na Figura 50 e na Figura 51. Além disso, pode-se notar que há maior concentração em número de partículas durante os dias de semana, que chegam a uma média de aproximadamente 29 mil partículas por litro para as partículas de diâmetros entre 0,25 e 0,28 µm nos dias de semana e 23 mil partículas por litro para partículas de mesmo diâmetro nos finais de semana.

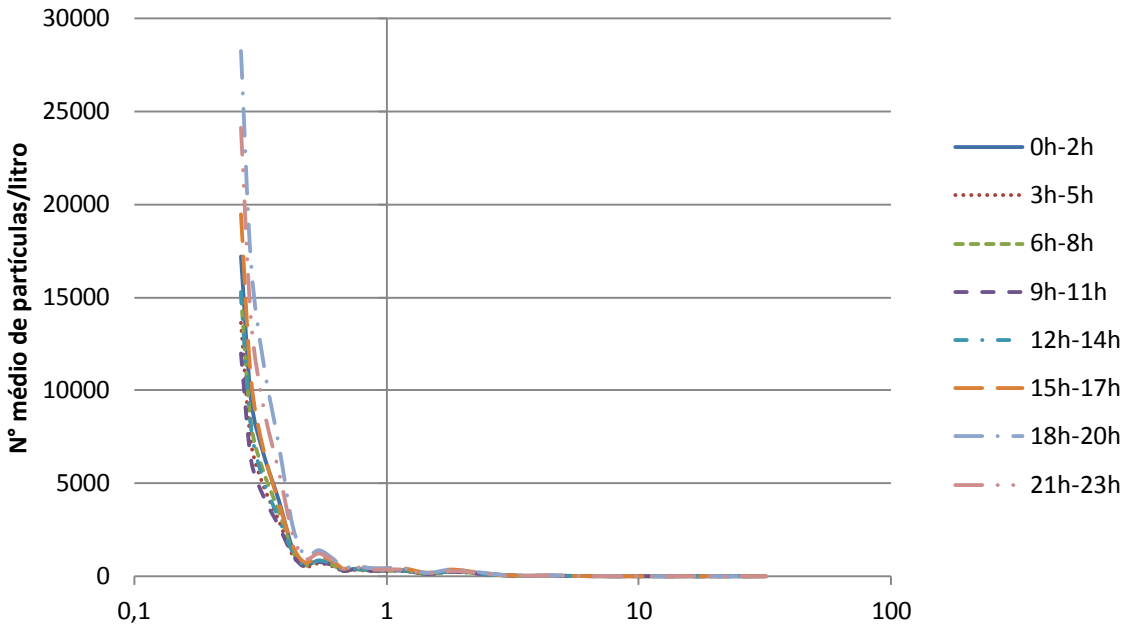


Figura 50. Distribuição de tamanho em número em função do diâmetro com média a cada 3 horas para os dias de semana amostrados.

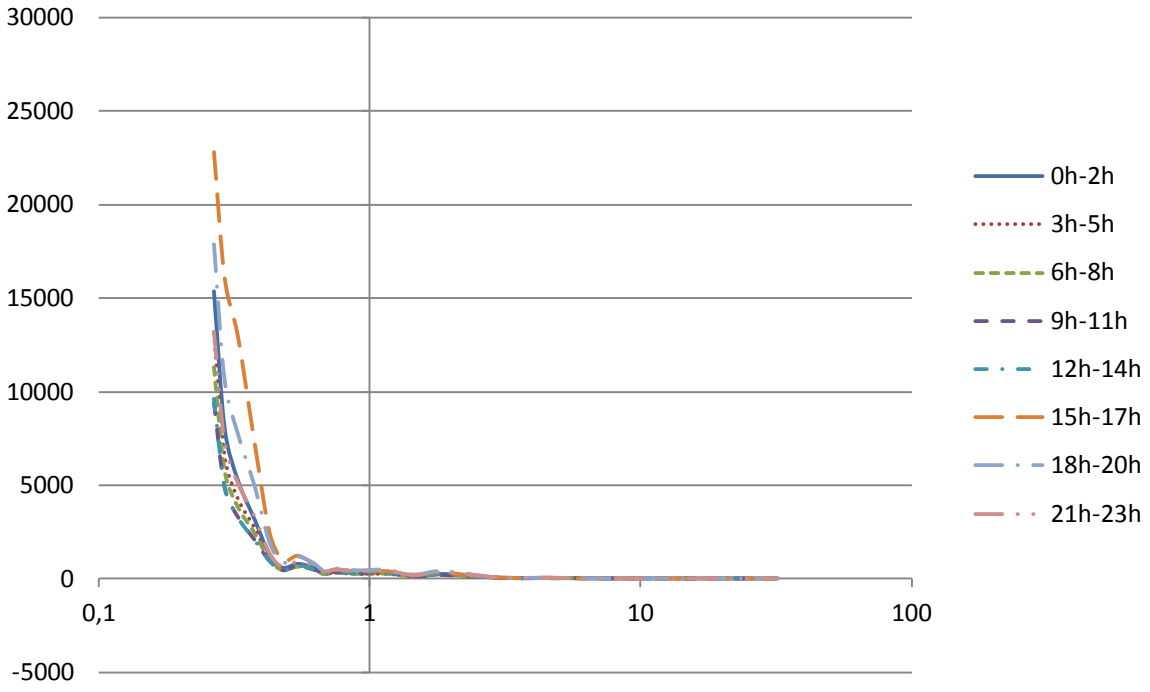


Figura 51. Distribuição de tamanho em número em função do diâmetro com média a cada 3 horas para os dias de final de semana amostrados.

A Figura 52 apresenta a distribuição de número partículas por litro a cada hora, dividindo as modas das partículas finas (d<2,5µm) e grossas (d>2,5µm). Pode-se perceber que as partículas finas alcançaram concentração de 20 milhões de

partículas por litro, ou 20 mil partículas por centímetro cúbico. Vale ressaltar que essas partículas, considerada a fração fina do material particulado atmosférico, são extremamente prejudiciais à saúde humana. Segundo Ynoue e Andrade (2004), a deposição das partículas no sistema respiratório humano, depende diretamente do tamanho das partículas, sendo que partículas com diâmetro menor que 10µm, consideradas partículas inaláveis, são capazes de penetrar pelo nariz e boca; partículas ditas torácicas, com diâmetro menor que 2,5 µm, são capazes de penetrar além da laringe; e as partículas respiráveis, com diâmetro menor que 1 µm são capazes de penetrar na região alveolar. Quanto maior a penetração no trato respiratório humano, mais prejudicial é a partícula.

Os resultados encontrados demonstram que a situação da RGV com relação às partículas finas deve ser melhor estudada e monitorada, tendo em vista suas consequências para a saúde humana e do meio ambiente, e a falta de preocupação das autoridades pertinentes com relação ao material particulado fino, visto que não há legislação nacional, estadual ou municipal para esse tipo de partículas para os locais amostrados.

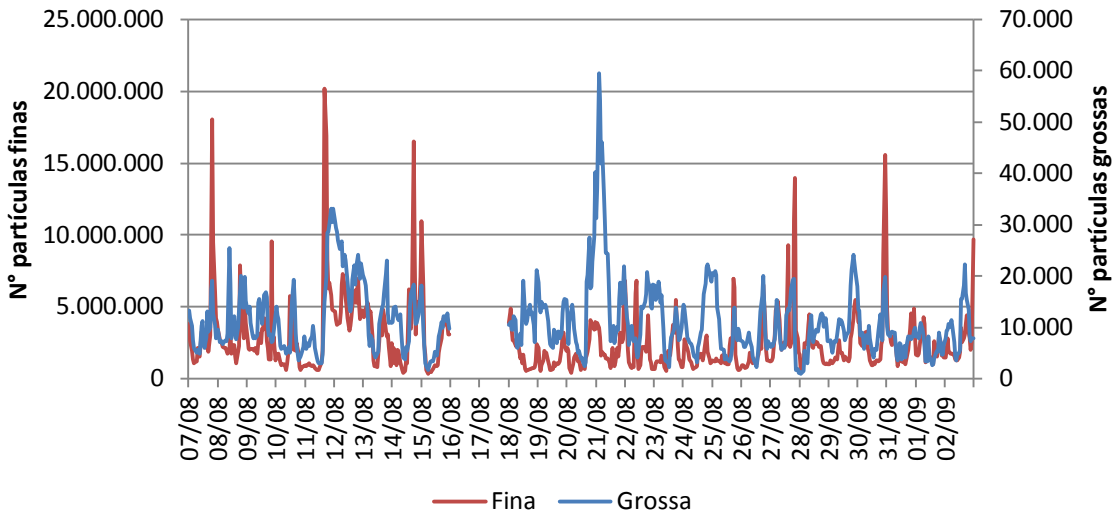


Figura 52. Distribuição do número partículas por litro a cada hora, considerando as modas das partículas finas e grossas.

7. Conclusões e Recomendações

O objetivo deste trabalho foi quantificar e avaliar os níveis de concentração do material particulado fino na Região da Grande Vitória (RGV) durante o inverno de 2013, além de identificar os principais sistemas sinóticos predominantes na RGV durante o período de estudo e avaliar sua influência nos níveis de concentração do $MP_{2,5}$. Além disso, este trabalho também teve como objetivo avaliar a distribuição de tamanho das partículas finas coletadas na região.

A principal motivação para este estudo foi contribuir no conhecimento dos níveis de material particulado fino na região da Grande Vitória, tendo em vista os poucos estudos na região sobre o assunto e a inexistência de estudos que relacionem os eventos meteorológicos e a concentração do material particulado fino, além das potenciais consequências do material particulado para a saúde humana e do meio ambiente.

Os resultados das análises gravimétricas indicaram que, na RGV, as concentrações de $MP_{2,5}$ médias do período completo variaram entre 9,70 µg/m³ e 14,36 µg/m³ nas seis localidades amostradas. A máxima média de 24 horas foi registrada na localidade de Jardim Camburi de 29,35 µg/m³ e a mínima na localidade do Ibes de 3,13 µg/m³. Pôde-se observar que, durante todo o período amostrado, a concentração limite de referência da OMS para média de 24 horas foi ultrapassada apenas duas vezes, uma vez em Jardim Camburi e outra em Cariacica.

Em relação aos dias de maiores concentrações em cada localidade, pôde-se notar que esses dias, em geral, foram dias sem chuva, em que a Alta Subtropical do Atlântico Sul esteve atuando sobre a região, dias marcados por ventos com baixas velocidades e direções predominantes NW-N-NE, o que indica contribuição das indústrias da região, que se encontram predominantemente a nordeste dos pontos.

A distribuição de tamanho das partículas indicou um maior número de partículas no horário de 18h às 21h, com uma média de 25 mil partículas de diâmetro entre 0,25 e 0,28 µm, o que caracteriza bem o perfil da fonte de emissão das partículas finas

da região que, provavelmente, é emissão veicular por queima dos combustíveis. Os dias de finais de semana mostraram-se diferentes dos dias de semana, com a faixa de horário com maior concentração mudando das 18h às 21h para 15h às 17h, e a média de número de partículas por litro diminui, indicando mais uma vez que a emissão veicular é a principal fonte de partículas da região, visto que nos finais de semana esta fonte é menos expressiva, diminuindo a concentração de partículas nestes dias.

Em relação à influência da meteorologia e dos sistemas sinóticos, verificou-se que as incidências de frentes frias ocasionaram em um aumento da velocidade do vento e na maioria das vezes resultaram em chuvas, que causaram consequente diminuição da concentração de partículas nos dias conseguintes. Também foi possível observar que nos dias em que foram encontradas as maiores concentrações em cada localidade, a ASAS esteve atuando sobre a região de estudo, causando baixas velocidades do vento e dificultando o transporte e dispersão dos poluentes, aumentando assim as concentrações.

Em geral, pôde-se observar que a concentração material particulado fino, tanto em número como em massa, sofre influência direta dos fenômenos meteorológicos de escala sinótica no período do inverno, quando esses fenômenos têm grande importância na circulação atmosférica, como já explicado ao longo do trabalho. Além disso, foi possível verificar a situação da RGV em relação ao $MP_{2,5}$ que, apesar de ter ultrapassado a concentração em massa recomendada pela OMS apenas 2 vezes, apresentou concentrações muito próximas desse limite ao longo do período estudado, justificando a necessidade de uma maior atenção a esse poluente, tendo em vista suas consequências para a saúde humana. Em relação à ao número de partículas, durante o período amostrado o número de partículas total em uma hora, considerando todas as faixas de tamanho medidas, chegou a 20 milhões por litro, ou 20 mil partículas por centímetro cúbico, ressaltando a importância do monitoramento e controle do material particulado, especialmente o fino, na região.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a realização de campanhas em outras épocas do ano, como o verão, para a verificação da

influência da sazonalidade na variação da concentração do material particulado fino na região. Além disso, recomenda-se realizar a análise química do material coletado, para verificação dos elementos químicos componentes e das possíveis fontes do material particulado da região. Também pode-se recomendar a realização de análises com o equipamento LAS para contagem de partículas em outros pontos de monitoramento na RGV, para uma maior abrangência do estudo.

8. Bibliografia

AIRMETRICS. **Minivol Operation Manual**. Eugene, OR, United States, 2011.

ALBUQUERQUE, T. T. A. **Distribuições de Tamanho, Composição Química e Identificação das Fontes do Aerossol Atmosférico de São Paulo: Um Estudo de Caso Para o Inverno de 2003**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ARYA, S. P. **Air Pollution, Meteorology and Dispersion.** Oxford University Press, New York, 1999.

BASTOS, C.C.; FERREIRA, N.J. **Análise Climatológica da Alta Subtropical do Atlântico Sul.** XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2000, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000.

BRASIL. **Lei N° 6.938, de 31 de agosto de 1981.** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 1981.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F.; JUSTI, M. G. A. **Tempo e Clima no Brasil.** São Paulo, Oficina de Textos, 2009.

CEPA – CANADIAN ENVIRONMENTAL REPORT ACT 1999. **Priority substances list assessment report: respirable particulate matter less than or equal to 10 microns.** 1999. Disponível em: <http://www.ec.gc.ca/>. Acessado em julho de 2013.

CETESB – COMPANIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Padrões da qualidade do ar**. São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa??es-B?sicas/22-Padr?es-e-?ndices>. Acessado em novembro de 2013.

COLLS, J. **Air Pollution**. USA: SPON Press Taylor & Francis Group, 2ed., 2002.

CPTEC – CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Análises Sinóticas.** Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/noticias/faces/noticias.jsp?idConsulta=&idQuadros=142> Acessado em outubro de 2013.

DIRECTIVE 2008/50/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL **Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe.** 2008. Disponível em <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/directive.htm>. Acessado em abril de 2013.

FERNANDES, J. S.; CARVALHO, A. M.; CAMPOS, J. F.; COSTA, L. O. FILHO, G. B. **Poluição atmosférica e efeitos respiratórios, cardiovasculares e reprodutivos na saúde humana.** Revista Médica de Minas Gerais 20(1): 92-101; 2010. Disponível em: <http://rmmg.medicina.ufmg.br/index.php/rmmg/article/viewDownloadInterstitial/212/197>. Acessado em julho de 2013.

FINLAYSON-PITTS, B. J.; PITTS, J. N. P. **Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere**. Academic Press, San Diego, 2000.

FREITAS, E. D.; ROZOFF, C. M.; COTTON, W. R.; DIAS, P. S. L. **Interactions of an urban heat and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil.** Boundary Layer Meteorology, São Paulo, n. 122, p. 43-65, 2007.

GRIMM. **Manual – Portable Laser Aerosol Spectrometer and Dust Monitor Model 1.108/1.109.** Technik GmbH & Co. KG. 2013.

HINDS, W. C. **Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles.** John Wiley & Sons, NY, 1982.

HOLGATE, S. T.; SAMET, J. M.; KOREN, H. S.; MAYNARD, R. L**. Air Pollution and Health**. San Diego: Academic Press, 1999.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acessado em abril de 2013.

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo. **Relatório da qualidade do ar na região da Grande Vitória 2006**. Vitória, 2006. Disponível em <http://www.meioambiente.es.gov.br/>. Acessado em outubro de 2013.

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo. **Relatório da qualidade do ar na região da Grande Vitória 2007**. Vitória, 2007. Disponível em <http://www.meioambiente.es.gov.br/>. Acessado em abril de 2013.

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo. **Inventário de emissões atmosféricas da Região da Grande Vitória.** Vitória, 2011. Disponível em <http://www.meioambiente.es.gov.br/>. Acessado em outubro de 2013.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Gráficos Climatológicos.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>. Acessado em setembro de 2013.

IJSN – Instituto Jones dos Santos Neves do Estado do Espírito Santo. **Perfil Regional – Região Metropolitana da Grande Vitória.** Vitória, 2008. Disponível em <http://www.ijsn.es.gov.br/>. Acessado em junho de 2013.

JACOBSON, M. Z. **Atmospheric Pollution** – *History, Science and Regulation*. Cambridge University Press, 2002.

KODAMA, Y. **Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (The Baiu Frontal Zone, The SPCZ and The SACZ), Part I: Characteristics of Subtropical Precipitation Zones**. J. Met. Soc. Japan, 70: 813-836, 1993.

LEE, S.; LIU, W.; WANG, Y.; RUSSELL, A. G.; EDGERTON, E. S. **Source apportionment of PM2.5: Comparing PMF and CMB results for four ambient monitoring sites in the southeastern United States.** Atmospheric Environment, v. 42, p. 4126-4137, 2008.

LEMOS, C. F; CALBETE, N. O. **Sistemas Frontais que atuaram no Brasil de 1987 a 1995**. Net, 1996. *Climanálise especial, edição comemorativa de 10 anos.* MCT/INPE-CPTEC. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/14.html>. Acessado em 15 set. 2013.

LISBOA, H. M. **Controle da poluição atmosférica.** *Cap. 8: Meteorologia e dispersão atmosférica*. LCQAR, UFSC, Santa Catarina, 2007.

LLOPART, M. **Sistemas Meteorológicos Atuantes na América do Sul.** USP, São Paulo, 2012.

MAIOLI, B. G. **Quantificação e caracterização do material particulado fino ($MP_{2,5}$) na Região Metropolitana da Grande Vitória – ES.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2011.

MIRANDA, R. M. **Caracterização físico-química e propriedades ópticas do aerossol urbano na Região Metropolitana de São Paulo**. Tese de doutorado, IAG-USP, 2001.

NIMER, E. **Climatologia no Brasil.** 2ª Ed. Rio de Janeiro: Fundação IBGE, 1989.

PEREIRA, J. L. G. **Qualidade do ar em ambiente intraurbano. Estudo de caso: IPEC/FIOCRUZ – Rio de Janeiro/RJ.** Dissertação de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

QUADRO, M. F. L. **Estudos de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE. São José dos Campos, 1994.

REDEMET – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica. **Consulta de Mensagens Meteorológicas.** 2013. Disponível em < http://www.redemet.aer.mil.br/consulta_msg/consulta_de_mensagem.php?ID_REDEMET=kokhcn80hjtjmpq61eoelio0v6> Acessado em outubro de 2013.

ROCHA, A. M. G. C.; GANDU, A. W. **A Zona de Convergência do Atlântico Sul.** *Climanálise – Edição Especial Comemorativa de 10 anos, Cap. 16.* São Paulo, 1996. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/16.html>. Acessado em julho de 2013.

RUZER, L. S., HARLEY, N. H. **Aerosols Handbook**: *Measurement, Dosimetry, and Health Effects.* CRC Press, 2004.

SANT'ANNA NETO, J. L. **Decálogo da climatologia do Sudeste Brasileiro.** Rev. Bras. Climat., v. 1, n. 1, p. 41-60, 2005.

SCHROEDER, R. **Precipitações no Estado de São Paulo**. Bragantia, Campinas, v.15, n. 18, p. 194-249, 1958.

SEINFELD J.H. **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution.** Wiley-Interscience, New York, 1986.

SEINFELD J.H., PANDIS S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics**: *from Air Pollution to Climate Change*. Editado por John Wiley & Sons, 2006.

SOUZA, P. A. de; MELLO, W. Z de.; MARIANI, R. L.; SELLA, S. M. **Caracterização do Material Particulado Fino e Grosso e Composição da Fração Inorgânica Solúvel em Água em São José dos Campos (SP).** Quim. Nova, Vol. 33, No. 6, p. 1247-1253, 2010.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Quality Assurance Guidance Document - Model Quality Assurance Project Plan for the PM Ambient Air 2.5 Monitoring Program at State and Local Air Monitoring Stations (SLAMS).** Draft Report, n°. EPA-454/R-98-005, Estados Unidos, 1998.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Particulate Matter (PM) Standards - Review Completed in 2006**, Estados Unidos, 2006. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/s_pm_cr.html>. Acessado em junho de 2013.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Particulate Matter.** Disponível em: <http://www.epa.gov/air/particlepollution/>. Acessado em setembro de 2013.

VAREJÃO-SILVA, M. A.. **Meteorologia e climatologia**. 2. ed. Recife, 449 p., 2006.

VIANELLO, R. L., ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 1991.

WARNECK, P. **Chemistry of the natural atmosphere**. 2ª ed. Academic Press, 2000.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulphur Dioxide.** Global update 2005. Summary of Risk Assessment. Geneva, 2006.

WMO – World Meteorological Organization. **Technical Regulations, Vol. I**. WMO Publication No. 49. Geneva, Switzerland, 1984.

YNOUE, R. Y.; ANDRADE, M. F. **Size-Resolved Mass Balance of Aerosol Particles over the São Paulo Metropolitan Area of Brazil**. Aerosol Science and Technology, v. 38(S2), p. 52–62, 2004.

9. Apêndice

Tabela 6. Concentrações de $MP_{2,5}$ em µg/m³ obtidas na análise gravimétrica, para todas as localidades.

Datas das Amostras	CAMPANHA DE INVERNO - 2013 (Concentração em µg/m3)						
	LARANJEIRAS	J. CAMBURI	ENSEADA	VITÓRIA CENTRO	IBES	CARIACICA	ERRO
21/06/13	15,36		9,98	8,82	**22,26**	11,96	± 0,83
23/06/13	6,03	14,21	5,59	5,68	**3,13**	6,64	± 0,83
25/06/13	14,14		15,32	11,87	21,24	21,48	± 0,83
27/06/13	13,35	23,79	8,70	4,75	10,76	11,06	± 0,83
29/06/13	13,23	16,44	10,32	8,22	10,77	10,94	± 0,83
01/07/13	**19,39**	16,46	16,17	14,32	17,48	15,58	± 3,05
03/07/13	9,85	7,64	9,21	9,92		18,34	± 3,05
05/07/13	8,72	**6,14**	8,00	10,57	19,70	17,07	± 3,05
07/07/13	14,18		8,00	7,29	6,55	8,89	± 3,05
09/07/13	13,36	9,85	10,74		16,00	20,81	± 3,05
11/07/13	9,47	9,22	7,85	**3,30**	7,54	7,59	± 3,05
13/07/13	12,00	19,59	9,23	6,76	9,79	8,86	± 3,05
15/07/13	19,04	15,15	7,65	11,96	9,24	15,35	± 3,05
17/07/13	16,06	14,20	9,39	11,19	14,15	16,16	± 1,25
19/07/13	16,63	14,52	9,94	9,25	13,01	11,19	± 1,25
21/07/13	13,45	17,23	5,55	7,61	9,31	7,29	± 1,25
23/07/13	13,32	13,69	**19,25**	13,57	9,36	12,57	± 1,25
25/07/13	10,94	18,32	13,67	19,80	11,54	15,14	± 1,25
27/07/13	8,29	9,14	10,24	11,05	7,34	10,43	± 1,25
29/07/13	12,43	16,11	15,28	17,25	17,07	16,91	± 1,25
31/07/13	14,76	15,23	11,39	17,20	15,07	**27,99**	± 3,19
02/08/13	15,11	14,69	11,90	12,59	11,98	19,17	± 3,19
04/08/13	13,02	14,29	9,11	7,42	8,41	7,27	± 3,19
06/08/13	15,35	22,63	17,69	**21,48**	19,05	21,84	± 3,19
08/08/13	14,49	9,34	10,42	17,14	13,87	20,80	± 3,19
10/08/13	13,76		6,51	7,24	7,96	8,87	± 3,19
12/08/13	13,62	16,17	12,67	18,00	11,57	15,98	± 3,19
14/08/13	15,44	15,27	10,62	12,15	11,18	12,13	± 0,97
16/08/13	10,42	11,18	11,27	15,74	10,22	14,03	± 0,97
18/08/13	5,39	6,68	6,07	10,54	8,63	8,55	± 0,97
20/08/13	6,40	9,10	6,88	8,89	5,43	10,23	± 0,97
22/08/13	12,32	23,36	7,31	5,83	6,53	6,08	± 0,97
24/08/13	11,76	20,46	7,96	6,19	5,10	6,83	± 0,97
26/08/13	17,77	17,39	8,38	11,15	6,37	7,61	± 0,97
28/08/13	5,78	8,21	**4,84**	7,40	5,31	11,10	± 1,81
30/08/13	8,92	15,68	10,46	9,79	18,91	15,92	± 1,81
01/09/13	8,96	11,10	6,02	6,43	7,08	8,31	± 1,81
03/09/13	15,63	14,16	9,42	9,65	10,50	7,99	± 1,81
05/09/13	7,68	8,11	7,54	7,16	5,45	10,14	± 1,81
07/09/13	**5,27**		5,74	5,77	6,05	6,29	± 1,81
09/09/13	9,59	11,35	13,71	8,95	5,71	8,55	± 1,81
11/09/13	5,92	9,53	9,20	9,05	8,54	11,37	± 2,22

13/09/13	13,60	**29,35**	9,72	7,67	7,18	9,65	± 2,22
15/09/13	6,46	12,68	5,53	5,69	4,73	5,84	± 2,22
17/09/13	12,72	9,88	7,10	5,59	5,00	**4,87**	± 2,22
19/09/13	13,61	15,04	9,64	12,71	9,87	12,57	± 2,22
21/09/13	9,96	20,41	8,61	7,18	7,03	7,30	± 2,22
MÁXIMA	19,39	29,35	19,25	21,48	22,26	27,99	
MÉDIA	**11,98**	**14,36**	**9,70**	**10,17**	**10,41**	**12,16**	
MÍNIMA	5,27	6,14	4,84	3,30	3,13	5,84	

OBS.: A coluna de erro foi calculada para que tenha a mesma unidade das concentrações, ou seja, µg/m³. Para isso, foi considerado que a vazão média de todos os aparelhos era 5,0 L/min, que é igual a 0,3 m³/h e durante 24h, o volume de ar é de 7,2 m³. Portanto, a massa em µg do filtro branco que resultou no maior erro, que coincidentemente foi o filtro branco de campo para todas as semanas, foi dividida por 7,2 m³ para obter-se a concentração em µg/m³.