UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LUCAS DE ASSIS SOARES

LUISA NUNES RAMALDES

ESTUDO COMPARATIVO DOS MODELOS DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA - CALPUFF E AERMOD - ATRAVÉS DA ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR NA REGIÃO METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA

VITÓRIA

2012

LUCAS DE ASSIS SOARES

LUISA NUNES RAMALDES

ESTUDO COMPARATIVO DOS MODELOS DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA - CALPUFF E AERMOD - ATRAVÉS DA ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR NA REGIÃO METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA

Orientador: Prof. Dr. Neyval Costa Reis Junior

Co-Orientadora: Prof. Dr. Taciana Toledo de Almeida Albuquerque

VITÓRIA

2012

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS 3
LISTA DE FIGURAS 4
LISTA DE TABELAS 8
1. INTRODUÇÃO 9
2. OBJETIVOS 12
2.1. OBJETIVO GERAL 12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 12
3. REVISÃO DA LITERATURA 13
3.1. CAMADA LIMITE PLANETÁRIA 13
3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DO AR 14
3.2.1 MODELO DE DISPERSÃO GAUSSIANO 15
3.3. REVISÃO DE PESQUISAS 17
4. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO 23
5. METODOLOGIA 35
5.1. REDE DE AUTOMÁTICA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR 35
5.2. INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DA REGIÃO DA GRANDE VITÓRIA 37
5.3. DOMÍNIO DE ESTUDO 47
5.4. MODELAGEM DAS FONTES 48
5.6.1. FONTES PONTUAIS 48
5.6.2. FONTES VOLUMÉTRICAS 49
5.6.3. FONTES SUPERFICIAIS 50
5.6.4 FONTES LINEARES 51
5.6.5. RECEPTORES 52
5.5. O MODELO AERMOD 52
5.5.1. AERMET 53
5.5.2. AERMAP 56
5.5.3. AERMOD 57
5.6. O MODELO CALPUFF 59
5.6.1. PRÉ-PROCESSADORES 60

5.6.2. CALMET 62
5.6.3. CALPUFF 64
5.6.4. CALSUM 66
5.6.5. CALPOST 66
5.7. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS 67
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES 70
7. CONCLUSÕES 91
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 94
ANEXO I - ARQUIVO DE ENTRADA DA PRIMEIRA ETAPA DO AERMET 100
ANEXO II - ARQUIVO DE ENTRADA DA SEGUNDA ETAPA DO AERMET 101
ANEXO III - ARQUIVO DE ENTRADA DA TERCEIRA ETAPA DO AERMET 102
ANEXO IV –ARQUIVO DE CONTROLE DO CALMET 103
ANEXO V - DADOS METEOROLÓGICOS 104
ANEXO VI - ARQUIVO DE ENTRADA DO AERMAP 108
ANEXO VII - ARQUIVO DE ENTRADA DO AERMOD 109
ANEXO VIII - ARQUIVO DE ENTRADA DO CALPUFF 110

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida,
Às nossas famílias por todo o apoio desde o instante de nosso nascimento,
Aos nossos que sempre estiveram ao nosso lado,
Ao nosso orientador Neyval Costa Reis Júnior pelos ensinamentos compartilhados,
À nossa co-orientadora Taciana Toledo de Almeida Albuquerque por toda contribuição dada,
Ao nosso amigo Alexandre Magalhães Santiago por estar sempre disposto a ajudar,
Ao IEMA, e especialmente Adriana Bazílio S. Frutuozo, por nos fornecer dados das estações meteorológicos e de monitoramento da qualidade do ar,
E a todos que direta ou indiretamente ajudaram no desenvolvimento do trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da camada limite planetária, adaptado de STULL (1988).....13

Figura 2 - Tipos de plumas de dispersão, adaptado de WARK, WERNER e DAVIS (1998).....16

Figura 3 - Região Metropolitana da Grande Vitória. Fonte: Dados gerais - RMGV, 2010.....23

Figura 4 - Reclamações sobre a qualidade do ar para o município de Vitória em 2009. Fonte: Secretaria de Meio Ambiente de Vitória, 2010. 24

Figura 5 - Precipitação pluviométrica mensal, estação Carapina, 2007. Fonte: IEMA, 2007.....26

Figura 6 - Umidade relativa do ar (%), segundo média horária, estação Carapina, 2007. Fonte: IEMA, 2007. 26

Figura 7 - Temperatura do ar (ºC), segundo média horária, estação Carapina, 2007. Fonte IEMA, 2007. 27

Figura 8 - Pressão atmosférica (mbar), segundo média horária, estação Carapina, 2007. Fonte: IEMA, 2007. 28

Figura 9 - Radiação solar (W/m²), segundo média horária, estação Carapina, 2007. Fonte: IEMA, 2007. 28

Figura 8 – Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Laranjeiras. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007. 31

Figura 11 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Carapina. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.....32

Figura 12 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Jardim Camburi. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007. 32

Figura 13 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Enseada do Suá. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.....33

Figura 14 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Vitória Centro. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007. 33

Figura 15 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Vila Velha Ibes. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007. 34

Figura 16 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Vila Velha Centro. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007. 34

Figura 17 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Cariacica. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007. 35

Figura 18 - Estações da RAMQAr. Fonte: IEMA, 2012. 36

Figura 19 - Localização das fontes emissoras de origem industrial na RGV. Fonte: IEMA, 2011.....38

Figura 20 - Representação das vias de tráfego primárias da RGV. Fonte: IEMA, 2011. 39

Figura 21 - Representação das vias de tráfego secundárias da RGV. Fonte: IEMA, 2011. 40

Figura 22 - Áreas habitadas dos municípios pertencentes à RGV. Fonte: IEMA, 2011. 41

Figura 23 - Localização dos aterros sanitários existentes na RGV. Fonte: IEMA, 2011. 42

Figura 24 - Postos de combustíveis inventariados na RGV. Fonte: IEMA, 2011. 43

Figura 25 - Localização do aeroporto de Vitória e portos inventariados na RGV. Fonte: IEMA, 2011. 44

Figura 26 - Cenário de emissões biogênicas de compostos orgânicos voláteis na RGV. Fonte: IEMA, 2011. 45

Figura 25 - Função de tráfego horária para veículos leves. Fonte: IEMA, 2011.....46

Figura 28 - Função de tráfego semanal para veículos leves. Fonte: IEMA, 2011. 46

Figura 29 - Função de tráfego mensal para veículos leves. Fonte: IEMA, 2011.....47

Figura 30 - Domínio de estudo. 48

Figura 31 – Modelagem de fonte volumétrica. Fonte: Silva e Sarnáglia, 2010.....49

Figura 32 - Exemplo de modelagem de fontes linhas. 52

Figura 33 – Um *puff* em dois instantes de tempo. Fonte: Moraes, 2004. 64

Figura 34 – Gráficos da média horária de concentração de PM_{10} (μg/m³) para a Estação de Laranjeiras medido pela: a) Estação; b)AERMOD e; c) CALPUFF.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 35 – Gráficos da média horária de concentração de PM_{10} (μg/m³) para a Estação de Carapina medido pela: a) Estação; b)AERMOD e; c) CALPUFF.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 36 – Gráficos da média horária de concentração de PM_{10} (μg/m³) para a Estação Jardim Camburi medido pela: a) Estação; b)AERMOD e; c) CALPUFF.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 37 – Gráficos da média horária de concentração de PM_{10} (μg/m³) para a Estação Enseada do Suá medido pela: a) Estação; b)AERMOD e; c) CALPUFF.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 38 – Gráficos da média horária de concentração de PM_{10} (μg/m³) para a Estação Vitória Centro pela: a) Estação; b)AERMOD e; c) CALPUFF.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 39 – Gráficos da média horária de concentração de PM_{10} (μg/m³) para a Estação Ibes medido pela: a) Estação; b)AERMOD e; c) CALPUFF. . **Error! Bookmark not defined.**

Figura 40 – Gráficos da média horária de concentração de PM_{10} (μg/m³) para a Estação Vila Velha pela: a) Estação; b)AERMOD e; c) CALPUFF. ... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 41 – Gráficos da média horária de concentração de PM_{10} (μg/m³) para a Estação Cariacica medido pela: a) Estação; b)AERMOD e; c) CALPUFF.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 42 - Arquivo de entrada da primeira etapa do AERMET.....100

Figura 43 - Arquivo de entrada da segunda etapa do AERMET. 101

Figura 44 - Arquivo de entrada da terceira etapa do AERMET. 102

Figura 45 – Começo do arquivo de entrada .inp do CALMET. 103

Figura 46 - Temperatura ao longo do ano de 2010. Estação Carapina. 104

Figura 47 - Pressão ao longo do ano de 2010. Estação Carapina. 104

Figura 48 - Precipitação ao longo do ano de 2010. Estação Carapina.....105

Figura 49 - Insolação ao longo do ano de 2010. Estação Carapina. 105

Figura 50 - Umidade relativa ao longo do ano de 2010. Estação Carapina.....106

Figura 51 – Velocidade do vento ao longo do ano de 2010. Estação Carapina.....106

Figura 52 - Altura da camada de mistura ao longo do ano de 2010. Estação Carapina. 107

Figura 53 - Arquivo de entrada do AERMAP com apenas algumas fontes. 108

Figura 54 - Arquivo de entrada do AERMOD.....109

Figura 55 – Começo do arquivo de entrada do CALPUFF. 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Região Metropolitana da Grande Vitória. Fonte: Dados gerais - RMGV, 2010. ...23

Tabela 2 - Direção e velocidade dos ventos em 2007. Fonte: IEMA, 2007. 25

Tabela 3 – Concentração dos poluentes atmosféricos nas estações de monitoramento da qualidade do ar, na Região de Grande Vitória, para o ano de 2007 em microgramas por metro cúbico. Fonte: IEMA, 2007. 29

Tabela 4 – Média aritmética anual e registros válidos das Estações RAMQAr para o parâmetro PM_{10}, ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.....29

Tabela 5 – Média aritmética de 24 horas observada no período mensal das Estações RAMQAr para o parâmetro PM_{10}, ano 2007, em microgramas por metro cúbico. Fonte: IEMA, 2007. 30

Tabela 6 – Padrões nacionais de qualidade do ar. Fonte: CONAMA, 1990. 30

Tabela 7 – Faixas de concentrações dos poluentes para o cálculo do IQA. Fonte: EPA, 1994.....31

Tabela 8 - Medições da RAMQAr. Fonte: IEMA, 2012. 36

Tabela 9 - Fracionamento da frota de veículos da RGV por tipo de combustível. Fonte: IEMA, 2011. 46

Tabela 10 - Dimensões iniciais da pluma. Fonte: EPA, 2004. 50

Tabela 11: Descrição dos arquivos de entrada e saída do CALMET 64

Tabela 12: Descrição dos arquivos de entrada e saída do CALMET. 65

Tabela 13: Descrição dos arquivos de entrada e saída do CALMET. 66

Tabela 14 – Indicadores estatísticos das médias horárias das estações de monitoramento da RMGV 76

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Constituição Federal do Brasil, “todos têm o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para a presente e futuras gerações” (art. 225, do Capítulo VI do Título VIII).

De acordo com Wark, Warner e Davis (1998), a polução do ar foi documentada como um grande problema apenas nos séculos XIX e XX. Durante um *smog* em 1873 em Londres, relatou-se que 268 pessoas morreram inesperadamente de doenças relacionadas aos pulmões. Quase um século depois, ainda em Londres, no ano de 1952 ocorreu um *smog* que durou quatro dias no começo do mês de dezembro, e dez dias após o episódio foi descoberto que o número total de mortes na cidade superou a média geral com 4000 casos. Quatro anos depois, um caso de ocorrência de neblina extendida foi responsabilizado por 1000 incidentes de falecimento. No mesmo ano, o Parlamento inglês levantou o *Clean Air Act* e a Inglaterra ingressou em um programa de decréscimo da queima de carvão.

O mal uso dos recursos atmosféricos está presente em todas as partes do mundo, principalmente em áreas urbanas, devido a grande quantidade de fábricas, siderúrgicas, automóveis, entre outros. A Organização Mundial de Saúde (WHO - *World Health Organization*), em seu Guia da Qualidade do Ar (AQG - *Air Quality Guideline*) recorre que a evidência de material particulado na atmosfera e seu impacto na saúde pública é consistente na apresentação de efeitos adversos na saúde com exposições que são atualmente encontradas em populações urbanas, em ambos os países desenvolvidos e subdesenvolvidos.

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental Americana (*United States Environmental Protection Agency* - USEPA) (2011) o material particulado esta relacionado a uma série de problemas respiratórios e cardiocasculares graves. Os principais efeitos associados a exposição de ambiente com presença de material particulado incluem: morte prematura; agravamento em doenças respiratórias e

cardiovasculares; agravamento de asma; sintomas respiratórios agudos; bronquite crônica; funcionamento degenerativo do pulmão; e riscos maiores de infartos.

Diversos estudos foram realizados para relacionar problemas respiratórios e cardiovasculares recorrentes à saúde humana com a presença de material particulado no ar e qualidade do mesmo. Pope (2002) concluiu que as descobertas de seu estudo sustentam a evidência que longa exposição a poluição atmosférica de material particulado fino, comum a muitas áreas metropolitanas, é um importante fator de risco para mortalidade relacionadas a doenças cardiopulmonárias. Os efeitos na saúde devido a poluição atmosférica podem variar dependendo de condições de saúde e idade.

O material particulado é definido de acordo com seu tamanho aerodinâmico de suas partículas e quanto menores, mais perigosas são, pois possuem a capacidade de alcançar mais órgãos do sistema respiratório. Atualmente o indicador mais utilizado para quantificar o material particulado na atmosfera é o $PM_{10.}$ Esse representa o grupo de partículas que conseguem adentrar a traquéia respiratória e compreende ambas as partículas grossas (diâmetro de partícula entre 2,5 μm e 10 μm) e as partículas finas (que medem menos que 2,5 μm, PM2,5) que contribuem para os efeitos na saúde humana nos ambientes urbanos.

O Guia para Qualidade do Ar da WHO de 2005 estabelece limites para o parâmetro de material particulado para $PM_{2,5}$ de 10 $\mu g/m^3$ para média anual e 25 $\mu g/m^3$ para a média de 24 horas, e para PM_{10} de 20 $\mu g/m^3$ para a média anual e 50 $\mu g/m^3$ para a média de 24 horas.

No ano de 2000 no Estado do Espírito Santo, o maior número de queixas na Secretária Estadual de Meio Ambiente foram relativas ao incomodo da poluição atmosférica, totalizando uma porcentagem de 44,2% das reclamações referente a todas as reclamações recebidas. As próximas questões ambientais que receberam maiores queixas possuíram uma porcentagem de 12,2% e 8,5%, para o segundo e o terceiro lugar respectivamente, valores muito inferiores aos de poluição atmosférica (REIS, 2009).

A EPA possui uma série de modelos para a modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos. Dentre os modelos, a agência recomenda dois modelos principais, o

AERMOD, um modelo de pluma de estado estacionário que incorpora dispersão atmosférica baseada na estrutura turbulenta da camada limite planetária além de conceitos de escala, incluindo o tratamento de fontes de superfície e fontes elevadas, em terrenos simples e complexos; e o CALPUFF um modelo de dispersão por *puffs* de estado não estacionária que simulam os efeitos das variações das condições meteorológicas no transporte de poluentes, suas transformação e remoção (EPA, 2006).

O objetivo desse projeto é comparar os modelos AERMOD e CALPUFF para a previsão de PM_{10} para a Região Metropolitana da Grande Vitória através da comparação dos resultados obtidos por estes e os dados de monitoramento da qualidade do ar da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) disponibilizados pelo Instituto Estadual de Meio Ambiental e Recursos Hídricos do Espírito Santo (IEMA).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Comparar o desempenho dos modelos de dispersão atmosférica AERMOD e CALPUFF pela comparação dos resultados obtidos pelo modelo com os dados de monitoramento da qualidade do ar da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar as fontes de emissões atmosféricas estacionárias e móveis; pontuais, volumétricas, superficiais e lineares, do Inventário de Emissões Atmosféricas da Região Metropolitana da Grande Vitória, de acordo com as especificações dos modelos AERMOD e CALPUFF;

- Avaliar, através de indicadores estatísticos, qual dos modelos apresenta as concentrações de PM_{10} calculadas mais próximas das concentrações de PM_{10} medidas nas estações de monitoramento da qualidade do ar;

- Definir qual modelo melhor se adapta às condições de dispersão atmosférica da Região da Grande Vitória, devido a seu clima e seu relevo.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. CAMADA LIMITE PLANETÁRIA

Para a compreensão dos fenômenos interligados à dispersão de poluentes na atmosfera, é necessário o conhecimento da Camada Limite Planetária (CLP) e dos processos da baixa troposfera, pois é nessa região da atmosfera que ocorrem a maior parte das emissões de poluentes na atmosfera, naturais ou antropogênicas. De acordo com Turner (1994), a dispersão de um constituinte lançado na CLP depende diretamente da ação da turbulência e da velocidade do vento.

Stull (1998) afirma que a CLP é a região da troposfera diretamente influenciada pela presença da superfície da Terra e responde as forçantes superficiais, como por exemplo, forças de atrito, evaporação, emissão de poluentes entre outros em uma escala de tempo inferior a uma hora e sua altura varia de centenas de metros a vários quilômetros. O autor ainda recorre que os parâmetros como os fluxos turbulentos de calor e quantidade de movimento, e gradientes de umidade e temperatura potencial influenciam na estabilidade atmosférica com a turbulência de origem mecânica ou térmica e ainda são responsáveis pela existência de diferentes camadas: camada superficial, camada de mistura, camada residual, camada estável e camada de entranhamento. A Figura 1 apresentada abaixo ilustra as camadas componentes da CLP descritas acima

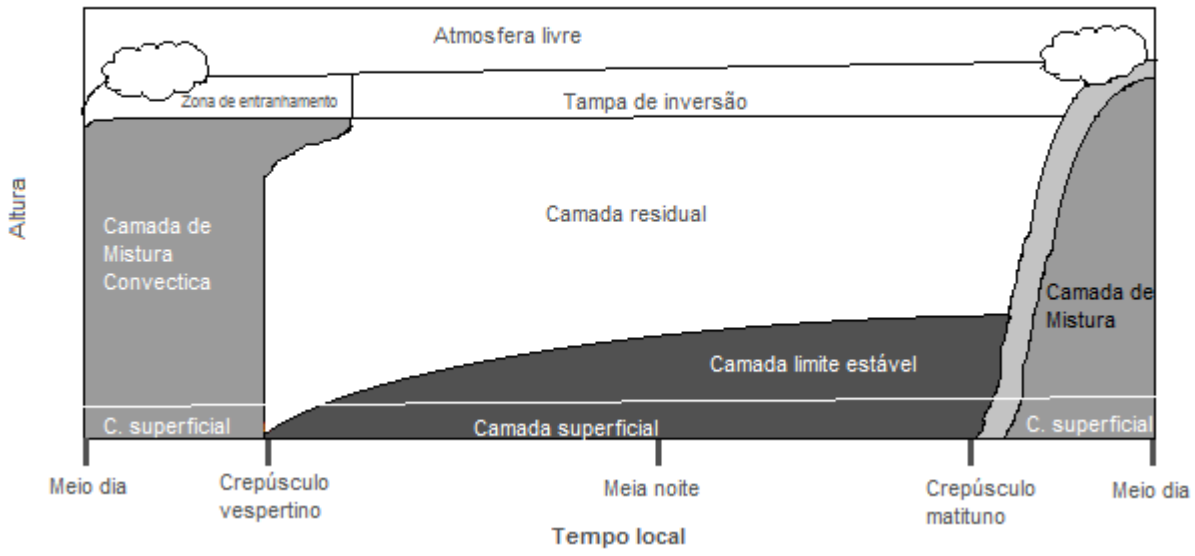

Figura 1 - Estrutura da camada limite planetária, adaptado de STULL (1988).

3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DO AR

Devido a globalização e generalização da preocupação com o meio ambiente e a saúde humana, o número de estudos e trabalhos científicos referentes as áreas de meteorologia e qualidade do ar aparecem cada vez em maior número ao decorrer dos anos. Os resultados provenientes do material científico com essa abordagem possuem o potencial de auxiliar a sociedade, o governo e as empresas privadas através de diretrizes de metodologias para estudo dos impactos ambientais e para ferramentas de monitoramento, assim como execução de estudos preliminares para previsão de possíveis impactos ambientais devido à emissão de poluentes na atmosfera, avaliação para instalação de fontes emissoras e necessidade de equipamentos de controle.

A dispersão de poluentes ocorre de acordo com uma série de fenômenos que ocorrem na Camada Limite Planetária e influenciam diretamente a capacidade dispersiva da atmosfera. É possível entender este transporte através de observações dos parâmetros influenciadores, entretanto, isto acarreta elevados custos de experimentalização, equipamentos e profissionais personalizados. Ainda, as observações experimentais não permitem uma completa previsão de futuros impactos ambientais, como por exemplo no caso da implantação de novas fontes emissoras. Com o intuito de solucionar esta problemática, cientistas desenvolveram ferramentas de estimativa da concentração de poluentes através de modelagens matemáticas do seu comportamento na atmosfera, de maneira que suas previsões pudessem ser utilizadas por agências reguladoras de meio ambiente e em pesquisas acadêmicas (SANTIAGO, 2009).

Os modelos de simulação matemática de dispersão e concentração de poluentes atmosféricos California Puff Model (CALPUFF) e American Meteorological Society Environmental Protection Agency Regulatory Model (AERMOD), 2004; propostos pela Agência Americana de Proteção Ambiental (US EPA) são amplamente indicados pela comunidade científica, órgãos reguladores e indústrias. Estes modelos requerem dados meteorológicos como parâmetros de entrada, assim como outros tantos parâmetros.

O cálculo da dispersão atmosférica de contaminantes através da modelagem matemática utiliza como base as equações fundamentais de transporte. Devido a complexidade destas equações, elas não possuem soluções analíticas para a maior parte dos casos práticos, dessa forma, é necessário o uso de métodos numéricos para a resolução e os modelos

matemáticos são elaborados então a partir de simplificações das equações de transporte. Esse método vem sendo amplamente usado, e recomendado por órgãos ambientais reguladores, devido principalmente ao baixo custo e rapidez na obtenção dos prognósticos de impacto ambiental.

3.2.1 MODELO DE DISPERSÃO GAUSSIANO

Um tipo de modelo de dispersão vastamente indicado é o modelo gaussiano de simulação da dispersão atmosférica de poluentes. Este modelo pode ser utilizado com ambos os métodos de descrição do movimento, euleriano ou lagrangeano, com exigência de que a distribuição lateral e a vertical de concentração de contaminantes assumam a distribuição gaussiana. O modelo de dispersão atmosférica CALPPUFF consiste em um modelo de dispersão lagrangeano gaussiano; enquanto o modelo AERMOD é caracterizado como euleriano gaussiano.

A dispersão de um poluente na atmosfera é o resultado de três mecanismos dominantes: (1) a média geral de movimento do ar que transporta o poluente a favor do vento; (2) as flutuações da velocidade turbulenta que dispersa os poluentes em todas as direções; e (3)a difusão devido aos gradientes de concentração. Em adição, as características aerodinâmicas gerais, tais como tamanho, forma, e peso, afetam a taxa que partículas não gasosas se depositam no solo ou se elevam na atmosfera (WARK; WARNER; DAVIS, 1998).

Os autores Wark, Warner e Davis (1998) ainda recorrem que a dispersão de poluentes na baixa atmosfera é facilitada pela mistura convectiva e turbulenta que ocorre na mesma. A variação vertical na qual essa mistura ocorre varia diariamente, nas mudanças de estação, e também é afetada pelas características topográficas, de forma que quanto maior essa variação, maior a diluição da concentração do poluente.

Devido aos mecanismos que afetam a dispersão de poluentes na atmosfera, como turbulência e ventos, as plumas possuem diferentes formas geográficas. Os seis tipos existentes de comportamento de pluma de constituintes são apresentadas na Figura 2 relacionadas com diferentes condições atmosféricas.

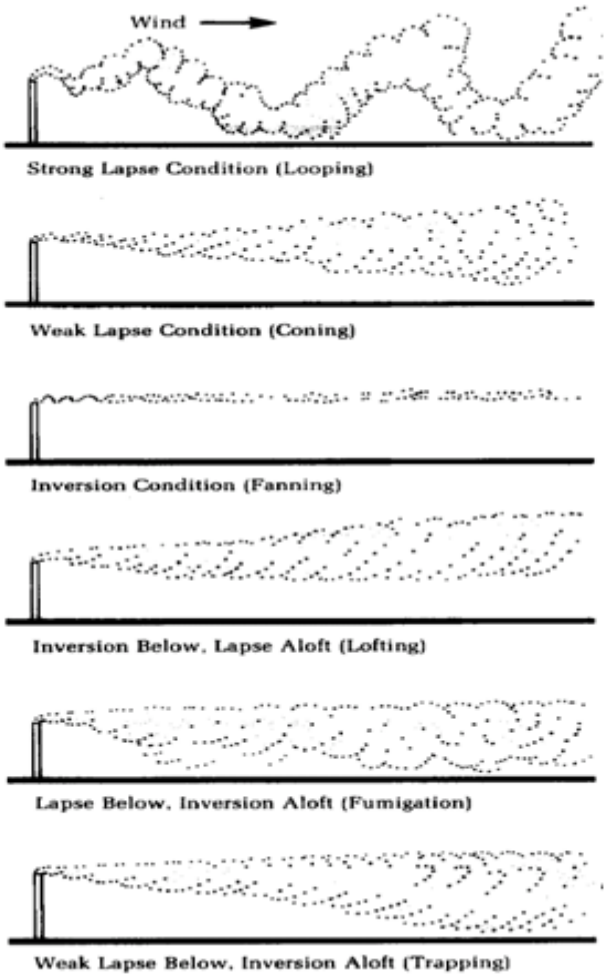

Figura 2 - Tipos de plumas de dispersão, adaptado de WARK, WERNER e DAVIS (1998).

Os modelos gaussianos de dispersão buscam simular o comportamento das plumas de poluentes emitidas a partir de fontes ao nível do solo e superiores ao solo de dispersão de poluentes. De acordo com Seinfeld (2006), em condições ideiais, a média da concentração de constituintes emitidos de uma fonte pontual possuem um distribuição gaussiana. Esta afirmação, apesar de restrita ao caso de turbulência homogênea e estacionária, serve como base para as diversas fórmulas de difusão atmosférica.

As equações de pluma gaussiana tem sido amplamente utilizadas, pois, além de sua relativa simplicidade, os parâmetros de dispersão (σ_y e σ_x) usados são derivados de concentrações medidas em condições reais em experimentos de difusão em condições próximas a aquelas de aplicação (SEINFELD, 2006).

Os valores dos coeficientes de dispersão vertical e horizontal (σ_y e σ_x, respectivamente) variam de acordo com a estrutura de turbulência da atmosfera, a altura em relação a superfície, rugosidade da superfície, tempo de amostragem que a concentração do poluente será estimado, velocidade do vento, e distância da fonte emissora (TURNER, 1994).

3.3. REVISÃO DE PESQUISAS

Várias pesquisas têm sido feitas na área de dispersão atmosférica avaliando modelos de estimativa de concentrações. Sax e Isakov (2002) usaram técnicas conhecidas de análise de incertezas para demonstrar um método geral de avaliar a variabilidade e a incerteza de sistemas de modelagem Gaussiana da dispersão atmosférica de poluentes. Para tanto, foram feitas estimativas de variabilidade, diferenças temporais e espaciais nos valores de uma entrada; e incerteza, falta de conhecimento ou informação sobre uma quantidade cujo valor poderia ser estabelecido se um equipamento de medição perfeito fosse utilizado; na predição de concentrações de crômio hexavalente (um reconhecido carcinogênico humano) gerado pelas operações de uma instalação de reparos e construção naval na Califórnia. Os modelos utilizados foram o ISCST3 e o AERMOD, ambos fornecidos pela Environmental Protection Agency (EPA). Foi avaliada a incerteza dos modelos quanto às emissões, à alocação temporal e espacial das emissões, os parâmetros do modelo e a meteorologia.

Os autores ressaltam que, em modelos Gaussianos, as incertezas são divididas em incertezas de entrada, incertezas de parâmetros e incertezas conceituais. As incertezas de entrada acontecem porque tanto os dados meteorológicos quanto os de emissões de poluentes possuem incertezas de medidas e estimação; as incertezas de parâmetros ocorrem porque um único modelo nunca pode caracterizar completamente um modelo; e as incertezas conceituais ocorrem porque a programação numérica e a matemática não podem caracterizar completamente os processos físicos completos e a variabilidade natural (Hanna *et al.*, 1998).

Os resultados finais mostraram que as emissões representaram a fonte dominante de incerteza, de modo que a conclusão obtida foi que modelos Gaussianos são sensíveis às

emissões, ao local das emissões e à meteorologia, de modo que estes parâmetros de entrada devem ser bem caracterizados para minimizar a incerteza nos resultados dos modelos. Com relação aos modelos, o AERMOD apresentou um maior gradiente de concentrações de poluentes do que o ISCST3 para as diversas parametrizações, sendo que esse gradiente aumentava enquanto a distância entre fonte e receptor diminuía.

Caputo *et al* (2002) fizeram uma comparação entre vários modelos de dispersão atmosférica normalmente utilizados. Foram usados modelos Gaussianos, de pluma Gaussiana segmentada e modelos Lagrangianos. Os modelos utilizados foram o AERMOD, o HPDM (*Hybrid Plume Dispersion Model*), o PCCOSYMA (*PC Code System from Maria*) e o HYSPLIT (Hybrid Single-*Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) com uma fonte de emissões localizada em 37,35º N e 78,24º W em um terreno plano. O domínio estudado estava compreendido entre os paralelos 35,18º N e 41,16º N e os meridianos 80,56º W e 73,40º W, correspondendo a uma área de aproximadamente 650 x 650 km². O período de simulação correspondeu às primeiras catorze horas do dia 25 de março de 1999 (no tempo local).

Foram avaliados os pré-processadores meteorológicos dos modelos AERMOD e HPDM onde as maiores diferenças encontradas estavam na computação do fluxo de calor sensível e da velocidade de fricção cujos valores, como ressaltam os atores, impactam diretamente no comprimento de Monin-Obukov e no cálculo da altura de mistura. Também foi feita a conclusão de que o modelo de pluma Gaussiana segmentada (o PCCOSYMA) apresenta uma descrição mais realista do que aquela apresentada pelos modelos Gaussianos (AERMOD e HPDM) por limitar o comprimento da pluma na direção do vento. O código Lagrangeano (HYSPLIT) também determinou razoavelmente bem a rotação da pluma de contaminantes, de modo que não foram encontradas grandes diferenças entre o campo de ventos e o vento na localidade da fonte no caso analisado.

Zou *et al.* (2010) analisaram o desempenho do modelo AERMOD em diferentes escalas de tempo na determinação da concentração de dióxido de enxofre (SO_2) nos condados de Dallas e Ellis no Texas (Estados Unidos). Para tanto, apenas emissões pontuais e móveis foram consideradas como fontes de emissões. Como dados de condições meteorológicas e dados de elevação do terreno, foram utilizadas as saídas dos pré-processadores AERMET e AERMAP, respectivamente. As fontes móveis foram determinadas dividindo

toda a emissão de uma via proporcionalmente em vários segmentos que eram então tratados como fontes volumétricas.

De modo a avaliar o modelo, foram utilizadas concentrações medidas por estações automáticas de medição de gás e para comparar as concentrações observadas e simuladas, foram utilizados gráficos quantis-quantis (Q-Q), nos quais uma inclinação da curva central de 1:1 indica uma boa correlação entre os dados simulados e os dados observados. Também são usadas curvas auxiliares para mostrar o erro entre resultados simulados e resultados observados. Além dos gráficos citados, os autores também compararam o desempenho do modelo por medidas estatísticas, a saber: desvio padrão, erro (diferença entre resultados simulados médios e resultados medidos médios), coeficiente de correlação, tendência fracionária, variância fracionária, e o índice de correspondência.

Os resultados obtidos pelos autores mostram que as concentrações de SO2 simuladas pelo AERMOD em intervalos de 8 horas se relacionam melhor aos resultados observados do que as simulações de 1 hora e 3 horas. Além disso, observou-se que o modelo possui melhor performance na simulação do composto quando as fontes de emissões pontuais e móveis são utilizadas juntos do que separadamente.

Wang *et al* (2006) compararam os modelos CALPUFF, um modelo que trabalha com pequenos pacotes discretos de poluentes, os *puffs*, e o ISCST3, um modelo Gaussiano, na previsão de concentração de odores e determinação das taxas de emissões das fontes de poluentes, no caso grandes currais confinados. De maneira geral, observou-se que o modelo CALPUFF poderia prever razoavelmente bem as concentrações de odores enquanto o modelo ISCST3 geralmente subestimava esses valores, em comparação às concentrações medidas. Entretanto, ambos os modelos falharam em determinar as concentrações de pico de odores usando taxas de emissões médias constantes. Com relação à determinação das taxas de emissões das fontes de poluentes, os modelos apresentaram valores bem diferentes embora ambos fossem, de maneira geral, maior do que os valores medidos no local.

Indumati *et al.* (2009) estudaram o modelo CALPUFF na utilização deste sobre interfaces envolvendo terra, água e terra, superfícies heterogêneas nas quais é necessário incorporar características turbulentas diferentes utilizando categorias diferentes de estabilidade

atmosférica. O trabalho estudou a presença de um pequeno corpo d'água na dispersão de poluentes de uma área urbana, onde o efeito da diferença da rugosidade da terra e da água não foi considerada por não ser significante. A fonte de emissão foi suposta como no nível do solo (de modo a evitar dependência da concentração com a altura de lançamento) e um domínio de 50 km por 4 km foi definido em uma topografia plana e um curso d'água correndo ao longo do domínio. A altura de mistura foi definida como 5.000 metros em todo o domínio, visando remover a influência da concentração no nível do solo.

Os autores ressaltam que o pré-processador meteorológico do CALPUFF, o CALMET usa diferentes coeficientes de dispersão sobre diferentes superfície, mas assume a mesma condição de estabilidade atmosférica. Para o caso em questão, assumiu-se a estabilidade atmosférica sobre a terra como extremamente instável (categoria A) enquanto a estabilidade sobre a água foi estimada em moderadamente estável (categoria F). Essas classes de estabilidades foram inseridas através de um programa adicional desenvolvido pelos autores.

A conclusão dos autores foi de que as concentrações simuladas são significativamente afetadas pelo corpo d'água logo após este mas esse efeito diminui com a distância. O estudo mostra que a presença do corpo d'água aumenta as concentrações no nível do solo em um fator de até 50, mostrando que especificações realistas das características de turbulência sobre superfícies heterogêneas são importantes para uma melhor estimativas do modelo CALPUFF.

Macintosh *et al.* (2010) utilizaram o CALPUFF para avaliar a deposição de cádmio (Cd), chumbo (Pb) e zinco (Zc) de uma indústria de fundição de zinco cujas concentrações foram obtidas através de amostras de solo e de poeira obtidas das áreas circundantes. O terreno considerado é bastante montanhoso com ventos calmos durante a noite mostrando, portanto, condições associados com brisas de vale e ventos heterogêneos.

O domínio de modelagem foi uma área de 26 km por 20 km com uma malha ortogonal de espaçamento de 200 metros. Os autores concluíram que o CALPUFF pode prover predições razoavelmente próximas dos valores medidos para uma fonte discreta em um terreno complexo. Ainda, como as estimativas de deposição são calculadas como funções lineares das concentrações atmosféricas, o CALPUFF é considerado um modelo confiável para a estimativa de médias de longo termo em ambientes complexos. Os

índices de correlação encontrados se situaram perto de 0,75 mostrando uma boa relação entre os valores medidos e os valores simulados.

Silva e Sarnaglia (2010) estudaram a utilização do modelo CALPUFF na simulação da concentração de PM_{10} na região da Grande Vitória, verificando tanto os efeitos das fontes estacionárias quanto das fontes móveis. Concluiu-se que as primeiras possuem maior significância na qualidade do ar, enquanto as segundas são mais importantes em um nível local. Isso pode ocorrer pois as fontes pontuais, em geral, são mais altas e alcançam maiores distâncias. As fontes móveis tendem a emitir em alturas mais baixas e, pela presença de obstáculos, observam-se maiores concentrações próximas ao solo. Os autores também concluíram que o desempenho do modelo é melhorado com o aumento do tempo de média das concentrações, o que indica a dificuldade do modelo em acompanhar variações horárias.

Ainda segundo os autores, o modelo CALPUFF subestima as concentrações de PM_{10}, sendo que a justificação foi de que algumas fontes não foram incluídas. As fontes utilizadas foram as fontes disponíveis no Inventário de Emissões Atmosféricas da Grande Vitória de 2005.

Com relação à utilização de um modelo para a obtenção dos dados meteorológicos, Borge *et al.* (2008) avaliaram a utilização do modelo WRF para aplicações de qualidade do ar sobre a Península Ibérica. O estudo foi basicamente um teste de sensibilidade aos diversos parâmetros existentes no modelo, comparando com valores de temperatura, vento e umidade medidos na superfície.

Kesarkar *et al.* (2007) estudaram o acoplamento do WRF com o AERMOD para a modelagem da dispersão atmosférica para a previsão de PM_{10} na cidade de Pune, Índia. Segundo os autores, o AERMOD requer para seu funcionamento, dados meteorológicos horizontalmente homogêneos e estacionários da superfície e de camadas superiores com intervalo de uma hora. Para tanto, os autores utilizaram o WRF e verificaram, comparando entre valores de temperatura e velocidade de vento medidas e simuladas, que o modelo é capaz de gerar dados meteorológicos confiáveis de entrada para o AERMOD, embora o AERMOD, de maneira geral, tenha subestimado os valores de PM_{10} medidos.

Com o objetivo de qualificar um modelo que possa ser utilizado para as diversas situações atmosféricas atuantes na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), Soares (2010) realiza um estudo sobre a acaliação do Sistema de Modelagem CALPUFF (SMC) para as Bacias Aéreas I, II, II da RMRJ fazendo o uso do poluente SO2. O autor utilizou três estratégias, sendo que a primeira delas referente a comparação do CALPUFF com o AERMOD encontrou melhores índices estatísticos para este primeiro, aprimorando os índices quando aplicado maior refinamento da malha. Os índices utilizados foram fator de correlação, erro médio quadrático normalizado, fator de dois, desvio fracional e desvio fracional padrão. A segunda estratégia realizou testes do SMC para situações metereológicas de sistema frontal e Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASA), frequente na região de estudo e nos quais os modelos gaussianos não são aplicáveis. Por fim, a última estratégia fez o uso do SMC para simulação de transporte de poluentes entre as Bacias Aéreas.

Um outro estudo realizado na RMRJ faz o uso dos modelos AERMOD e CALPUFF para simular a dispersão de poluentes para o ano de 2008, e para o ano de 2020, conforme as medidas implantadas pelo Porgrama de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) em 2009. Para análise dos modelos foi feito o uso dos seguintes índices estatísticos: fator de correlação, fator de erro médio quadrático normalizado, fator de dois, desvio fracional e desvio fracional padrão (VICENTIVI, 2011). A a conclusão geral em relação a comparação dos modelos foi que o CALPUFF com modelagem das emissões industriais por fontes pontuais apresentou melhores resultados que o AERMOD nessa configuração. Entretanto, o AERMOD apresentou melhor resultado para fontes industriais como fonte de área, desse modo, a utilização do AERMOD nessa configuração mostrou-se uma opção viável para situações em que não estejam disponíveis dados individuais sobre as emissões das indústrias para utilização direta.

4. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO

A Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) situa-se no Estado do Espírito Santo e é formada por sete municípios: Vitória, Vila Velha, Cariacica, Serra, Viana, Guarapari (incorporado à RMGV em 1999) e Fundão (incorporado em 2001) como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Região Metropolitana da Grande Vitória. Fonte: Dados gerais - RMGV, 2010.

Esses sete municípios abrigam 46% da população total do Espírito Santo e 57% da população urbana do Estado. Em termos de área, a RMGV ocupa apenas 5% do território estadual conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Região Metropolitana da Grande Vitória. Fonte: Dados gerais - RMGV, 2010.

Município	Área (km²)	População (número de habitantes)
Cariacica	273,96	395.000

Fundão	287,68	16.000
Guarapari	599,00	110.000
Serra	552,70	408.000
Viana	311,08	60.000
Vila Velha	218,00	425.000
Vitória	95,22	326.000
RMGV	2.331,.1	1.730.000
Espírito Santo	46.184,10	

A qualidade do ar na RMGV é um assunto muito discutido pela população e a mídia local, principalmente devido ao fato da capital, Vitória, se localizar próxima a grandes empresas de siderurgia e mineração. A Figura 4 apresenta as estatísticas de reclamações registradas pela Secretaria de Meio Ambiente de Vitória no ano de 2009.

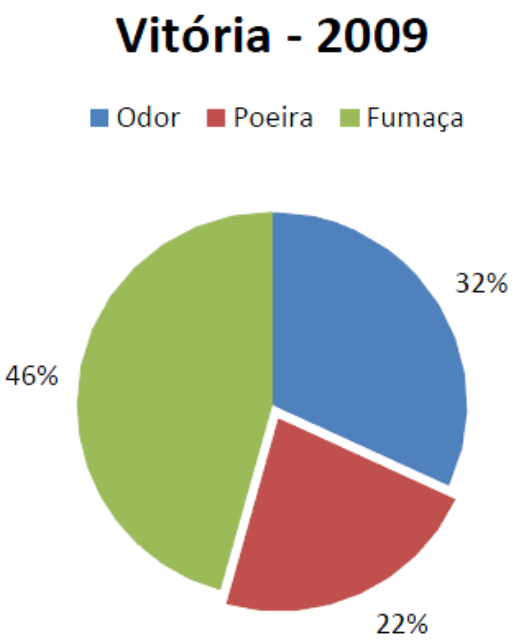

Figura 4 - Reclamações sobre a qualidade do ar para o município de Vitória em 2009. Fonte: Secretaria de Meio Ambiente de Vitória, 2010.

Com relação ao comportamento térmico e de umidade, a Região Metropolitana da Grande Vitória possui clima tropical quente (temperatura média do mês mais frio mais ou igual a 18ºC) e úmido. Esse clima é caracterizado por invernos amenos, com sensação de frio só verificada em forma de frentes frias esporádicas por ocasião das invasões do anticiclone polar, e por verões climáticos quentes e longos. (IEMA, 2007)

Na região, os principais sistemas de circulação atmosférica atuantes são o anticiclone subtropical do Atlântico Sul, responsável pelos ventos leste (L) e nordeste (NE) predominantes; e o anticiclone polar móvel, responsável pelas frentes frias. (IEMA, 2007)

A direção e velocidade dos ventos durante o ano de 2007 em algumas estações de monitoramento automático do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo, IEMA, estão mostradas na Tabela 2. Observa-se que a direção predominante do vento é a direção nordeste. Uma característica importante da velocidade dos ventos é que, embora seu aumento favoreça a dispersão dos poluentes gasosos, ele também contribui para o arraste de material particulado.

Tabela 2 - Direção e velocidade dos ventos em 2007. Fonte: IEMA, 2007.

ESTAÇÃO	PARÂMETROS	DIREÇÃO DO VENTO																
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	C
CARAPINA	Vel. Média (m/s)	2,11	2,13	2,91	2,77	1,90	1,78	2,00	1,99	2,43	1,80	1,09	1,13	1,01	0,75	0,99	1,77	0,00
	Vel. Máxima (m/s)	4,40	4,30	5,10	4,40	3,74	3,00	2,80	3,50	4,30	2,70	1,50	1,90	1,40	1,01	1,67	4,06	0,00
	Vel. Mínima (m/s)	0,50	0,50	0,52	0,60	0,84	0,60	0,95	0,60	0,61	0,93	0,60	0,54	0,50	0,50	0,57	0,50	0,00
	Ocorrência (%)	24,14	14,36	19,67	6,87	2,08	2,19	1,87	3,95	4,58	1,14	1,25	1,66	2,39	1,98	2,08	8,32	1,46
ENSEADA DO SUÁ	Vel. Média (m/s)	1,79	2,15	3,19	4,98	4,65	3,03	2,28	2,53	2,86	2,75	2,66	1,48	1,24	1,22	1,62	1,56	0,00
	Vel. Máxima (m/s)	3,70	3,90	6,20	9,20	8,60	5,20	4,30	4,91	5,40	6,74	5,71	3,30	2,00	3,09	1,86	3,35	0,00
	Vel. Mínima (m/s)	1,00	0,80	0,80	0,90	1,60	1,10	0,90	1,00	0,88	0,66	0,60	0,59	0,60	0,60	0,60	0,80	0,00
	Ocorrência (%)	3,90	10,02	25,00	19,05	4,58	3,68	2,40	3,17	4,41	6,51	6,72	2,10	2,10	1,28	2,48	2,57	0,04
CARIACICA	Vel. Média (m/s)	1,91	1,78	2,04	1,96	2,18	2,08	2,39	2,21	2,36	1,95	1,86	1,49	1,01	0,81	0,83	1,22	0,00
	Vel. Máxima (m/s)	4,70	4,20	4,30	4,13	4,00	4,00	4,40	5,30	5,40	5,10	5,80	3,70	3,40	1,70	3,10	3,79	0,00
	Vel. Mínima (m/s)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00
	Ocorrência (%)	15,54	21,26	14,44	6,49	3,63	2,40	3,53	2,62	4,87	4,61	6,23	5,46	2,29	1,45	1,37	2,59	1,22

A Figura 5 apresenta a precipitação pluviométrica mensal registrada na estação de Carapina durante o ano de 2007. Na figura é possível observar que a estação de maior precipitação vai de outubro a abril, enquanto o período de maio a setembro é de expressiva menor pluviosidade.

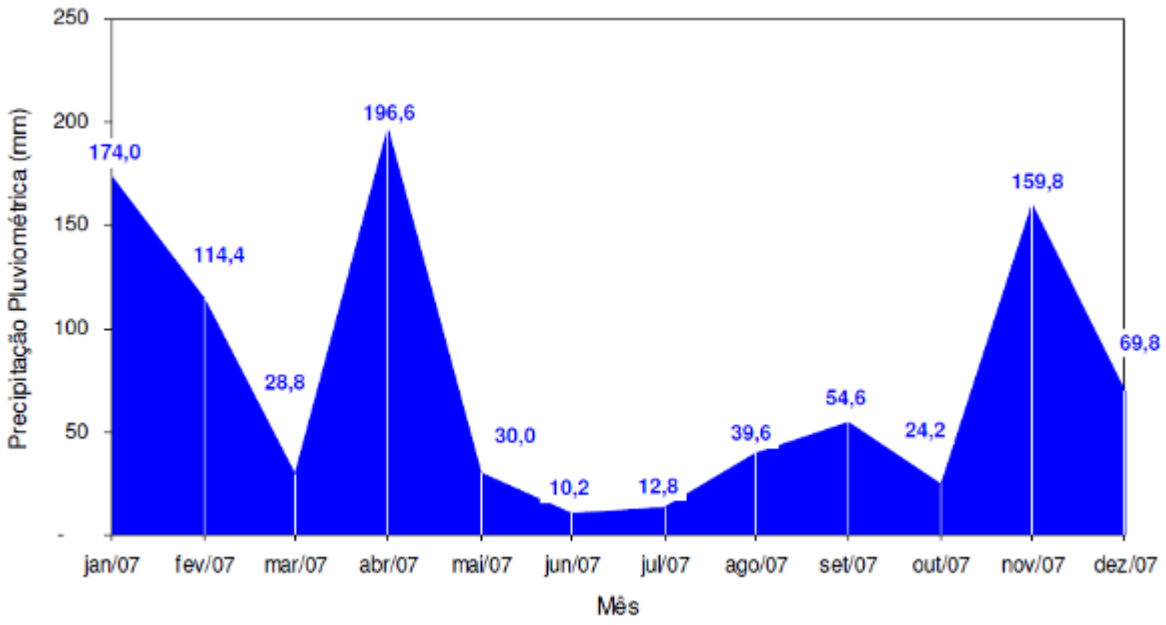

Figura 5 - Precipitação pluviométrica mensal, estação Carapina, 2007. Fonte: IEMA, 2007.

A Figura 6 apresenta os valores medido de umidade relativa do ar medidos no ano de 2007 na estação de Carapina. Observa-se, de maneira geral, uma pequena variação nos valores médios da umidade relativa do ar.

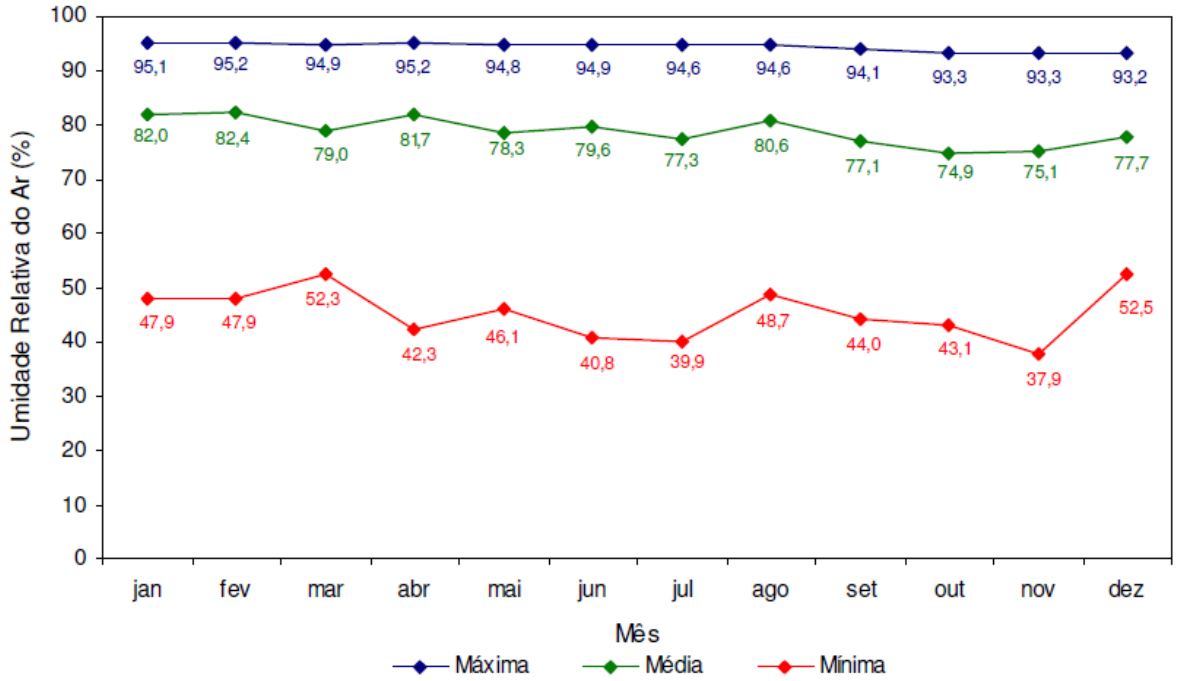

Figura 6 - Umidade relativa do ar (%), segundo média horária, estação Carapina, 2007. Fonte: IEMA, 2007.

A Figura 7 mostra os valores de temperaturas máximas, mínimas e médias mensais medidas na estação Carapina no ano de 2007. Pode-se observar a influências da sazonalidade sobre as temperaturas. No entanto, verifica-se que, de maneira geral, as variações são pequenas.

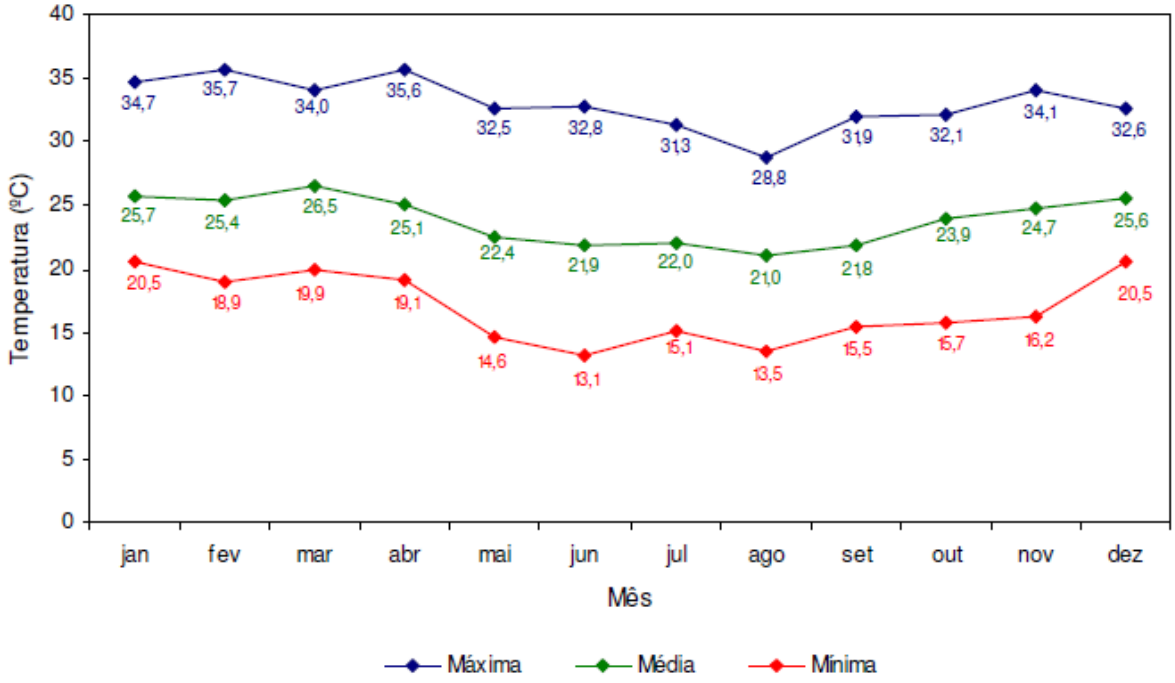

Figura 7 - Temperatura do ar (ºC), segundo média horária, estação Carapina, 2007. Fonte IEMA, 2007.

A Figura 8 apresenta os valores máximos, mínimos e médias mensais para a pressão atmosférica na estação de Carapina. No mês de julho não foram registrados valores pois o equipamento estava em manutenção.

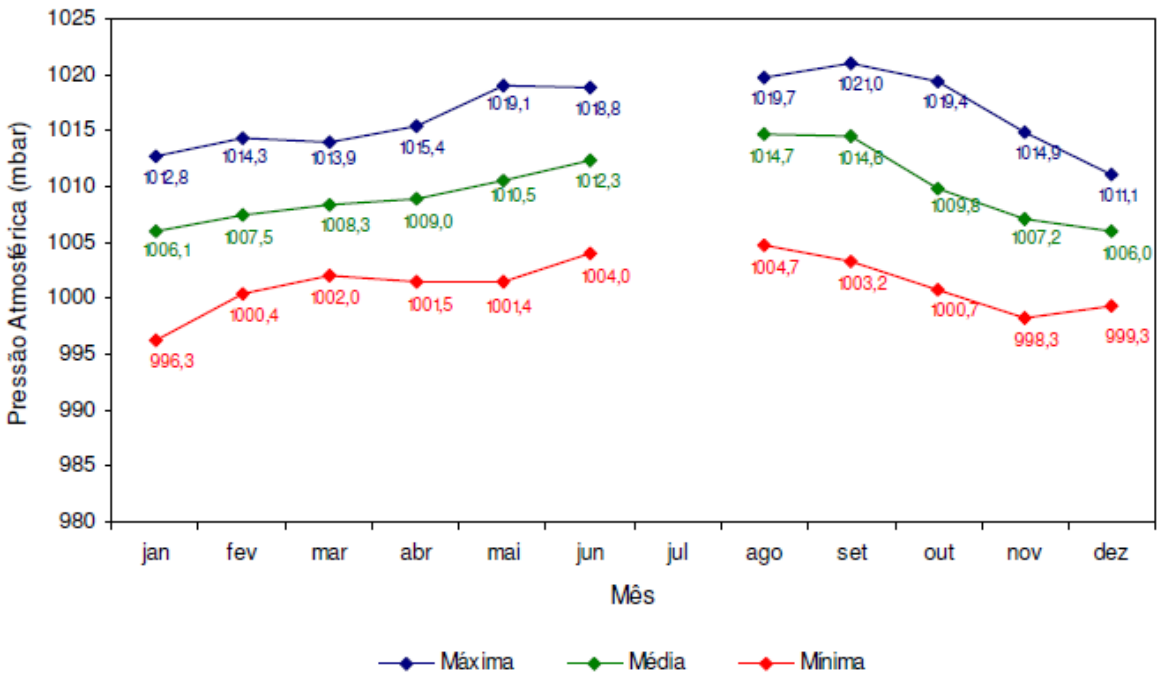

Figura 8 - Pressão atmosférica (mbar), segundo média horária, estação Carapina, 2007. Fonte: IEMA, 2007.

A Figura 9 exibe os valores máximos, mínimos e médias mensais de radiação solar ao longo de 2007 medidos na estação de Carapina.

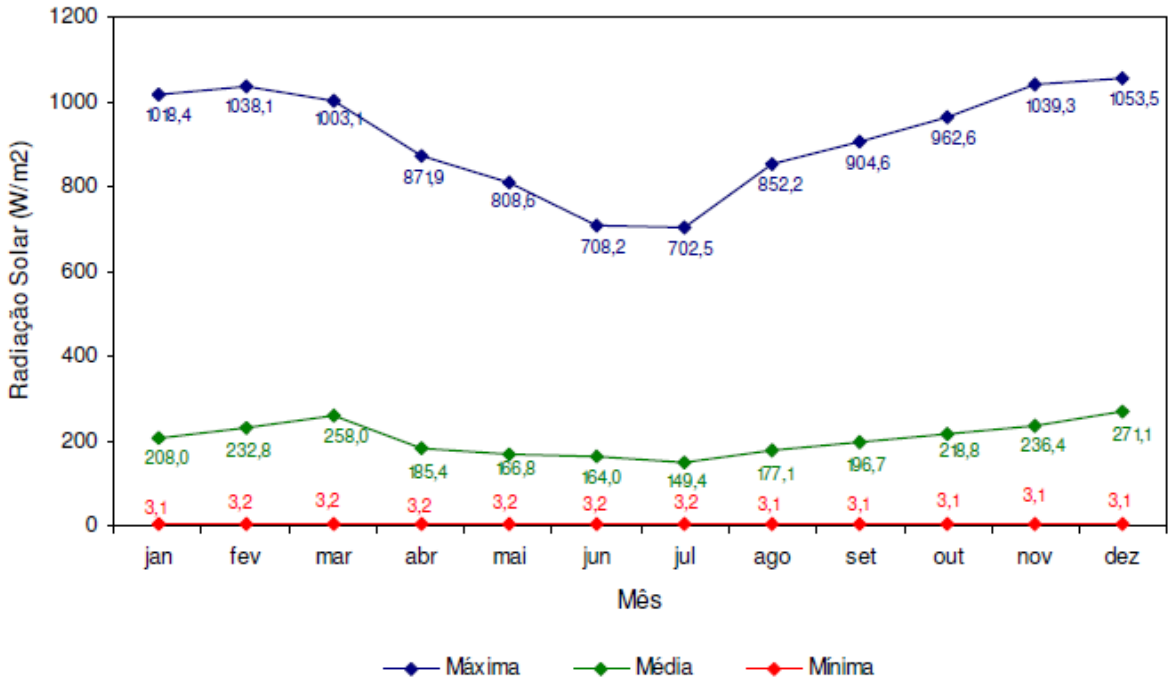

Figura 9 - Radiação solar (W/m²), segundo média horária, estação Carapina, 2007. Fonte: IEMA, 2007.

O relatório da qualidade do ar na Grande Vitória (IEMA, 2007) indica que as principais contribuintes para a poluição do ar na região são as emissões industriais, embora o crescimento da frota veicular e os empreendimentos imobiliários estejam alterando essa característica para o material particulado. A Tabela 3 apresenta a concentração dos poluentes atmosféricos em diversas estações de monitoramento da qualidade do ar na Região da Grande Vitória para o ano de 2007.

Tabela 3 – Concentração dos poluentes atmosféricos nas estações de monitoramento da qualidade do ar, na Região de Grande Vitória, para o ano de 2007 em microgramas por metro cúbico. Fonte: IEMA, 2007.

Poluente	ESTAÇÃO							
	Laranjeiras	Carapina	Jardim Camburi	Enseada do Suá	Vitória Centro	IBES	V. Velha - Centro	Cariacica
PTS[(1)]	49,3	-	-	34,3	29,0	30,1	-	49,1
PM10[(2)]	35,7	23,8	28,1	28,8	24,5	26,0	22,0	40,5
SO_2[(2)]	7,3	-	5,2	11,5	16,3	10,1	16,3	3,5
NO_2[(2)]	21,9	-	21,3	25,3	-	22,1	-	27,6
CO[(3)]	3082,9	-	-	4419,4	6009,0	3675,8	-	3036,5
O_3[(3)]	89,6	-	-	95,5	-	137,8	-	137,8

[(1)] Média Geométrica Anual; [(2)] Média Aritmética Anual; [(3)] Máxima Concentração ocorrida durante o período.

A Tabela 4 apresenta, para o parâmetro PM_{10}, além da média aritmética anual, o número de registros válidos para o ano de 2007. É possível observar que, neste ano, nenhuma das estações tiveram uma quantidade superior a 75% de observações válidas, de modo a não ser possível determinar a qualidade do ar quanto ao PM_{10} em 2007 segundo a Resolução CONAMA 03/1990.

Tabela 4 – Média aritmética anual e registros válidos das Estações RAMQAr para o parâmetro PM_{10}, ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.

ESTAÇÃO	MÉDIA ARITIMÉTRICA ANUAL [µg/m3]	NÚM. REG. VÁLIDOS	
		n	%
Laranjeiras*	35,71	2144	24%
Carapina*	23,8	1895	22%
Jardim Camburi*	28,12	2669	30%
Enseada do Suá*	28,76	2926	33%
Vitória Centro*	24,5	2386	27%
Vila Velha IBES*	25,99	2806	32%
Vila Velha Centro*	22,03	2294	26%
Cariacica*	40,47	1986	23%

* Não foi possível determinar a qualidade do ar nestas regiões.

A Tabela 5 mostra as médias aritméticas de 24 horas, nos meses em que foi possível fazer um registro. É possível observar que todos os valores medidos atendem ao padrão primário da Resolução CONAMA 03/1990 que estabelece como padrão a média aritmética anual de 50 microgramas por metro cúbico e 150 microgramas por metro cúbico para a média de 24 horas que não deve ser ultrapassada mais de uma vez por ano. A Tabela 6 mostra os padrões nacionais de qualidade do ar a título de referência.

Tabela 5 – Média aritmética de 24 horas observada no período mensal das Estações RAMQAr para o parâmetro PM_{10}, ano 2007, em microgramas por metro cúbico. Fonte: IEMA, 2007.

Mês	Laranjeiras		Carapina		Jardim Camburi		Enseada do Suá		Vitória Centro		Vila Velha IBES		Vila Velha Centro		Carlacica	
	Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	Max
jan	41,0	67,3	22,5	31,5	30,8	52,6	31,2	58,6	23,8	36,1	26,9	52,1	25,1	46,4	39,8	62,2
fev	31,1	54,9	23,4	43,4	24,8	35,6	25,8	40,2	23,4	31,3	24,8	34,6	19,9	28,7	38,4	62,3
mar	34,8	57,1	26,4	42,6	30,1	41,2	29,9	64,4	26,0	35,5	29,0	55,2	20,7	39,5	43,1	60,9
abr	29,7	30,9			26,2	42,3			25,4	35,6	22,8	37,2	23,4	30,5		
mai							28,8	41,0								
jun							26,5	38,9								
jul																
ago																
set																
out																
nov																
dez																

Tabela 6 – Padrões nacionais de qualidade do ar. Fonte: CONAMA, 1990.

POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM	PADRÃO PRIMÁRIO	PADRÃO SECUNDÁRIO	METODO DE AMOSTRAGEM
PTS	24 horas[1] MGA[2]	240 µg/m³ 80 µg/m³	150 µg/m³ 60 µg/m³	SEPARAÇÃO INERCIAL/FILTRAÇÃO
PM10	24 horas[1] MAA[3]	150µg/m³ 50 µg/m³	150 µg/m³ 50 µg/m³	SEPARAÇÃO INERCIAL/FILTRAÇÃO
CO	1 hora[1] 8 horas[1]	40.000 µg/m³ 35,0 ppm 10.000 µg/m³ 9,0 ppm	40.000 µg/m³ 35,0 ppm 10.000 µg/m³ 9,0 ppm	INFRAVERMELHO NÃO DISPERSIVO
O_3	1 hora[1]	160µg/m³	160 µg/m³	QUIMILUMINESCÊNCIA
SO_2	24 horas[1] MAA[3]	365 µg/m³ 80 µg/m³	100 µg/m³ 40 µg/m³	PARAROSANILINA
NO_2	1 hora[1] MAA[3]	320 µg/m³ 100 µg/m³	190 µg/m³ 100 µg/m³	QUIMILUMINESCÊNCIA

1 - Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano; 2 - Média Geométrica Anual; 3 - Média Aritmética Anual.

O Índice de Qualidade do Ar (IQA) é um parâmetro que permite determinar a qualidade do ar de uma forma geral, de modo a ser facilmente entendido pela maior parte da população. O índice é obtido através de uma função linear segmentada, onde os pontos de

inflexão são os padrões de qualidade do ar. Desse modo, o IQA é calculado com base na Tabela 7. Para efeito de divulgação, é utilizado o índice mais elevado (IEMA, 2007).

Tabela 7 – Faixas de concentrações dos poluentes para o cálculo do IQA. Fonte: EPA, 1994.

IQA		FAIXAS DE CONCENTRAÇÃO DOS POLUENTES (µg/m³)					
CLASSIFICAÇÃO	FAIXA	MÉDIA (24 HORAS)			MÉDIA (1 HORA)		MÉDIA (8 HORAS)
		PTS	PM_{10}	SO_2	NO_2	O_3	CO
Bom	0 - 50	0 - 80	0 - 50	0 - 80	0 - 100	0 - 80	0 - 5.000
Regular	51 - 100	81 - 240*	51 - 150*	81 - 365*	101 - 320*	81 - 160*	5.001 - 10.000
Inadequado	101 - 199	241 - 375	151 - 250	366 - 800	321 - 1130	161 - 200	10.001 - 17.000
Má	200 - 299	376 - 625	251 - 420	801 - 1600	1131 - 2260	201 - 800	17.001 - 34.000
Péssima	300 - 399	626 - 875	421 - 500	1601 -2100	2261 - 3000	801 - 1000	34.001 - 46.000
Crítica	> 400	> 876	> 501	> 2100	> 3000	> 1000	> 46.000

Observação: Os índices até a classificação "**Regular**", atendem ao Padrão de Qualidade do Ar estabelecido pela Resolução CONAMA nº03 de 28/06/1990. * Padrão CONAMA

As Figuras 10 a 17 apresentam o índice de IQA para o parâmetro PM_{10} no período em que foi possível fazer uma medida da concentração do mesmo, conforme as estações. É possível observar que, na maioria do tempo, o nível de concentração esteve na faixa considerada "BOA", esporadicamente atingindo a faixa de "REGULAR".

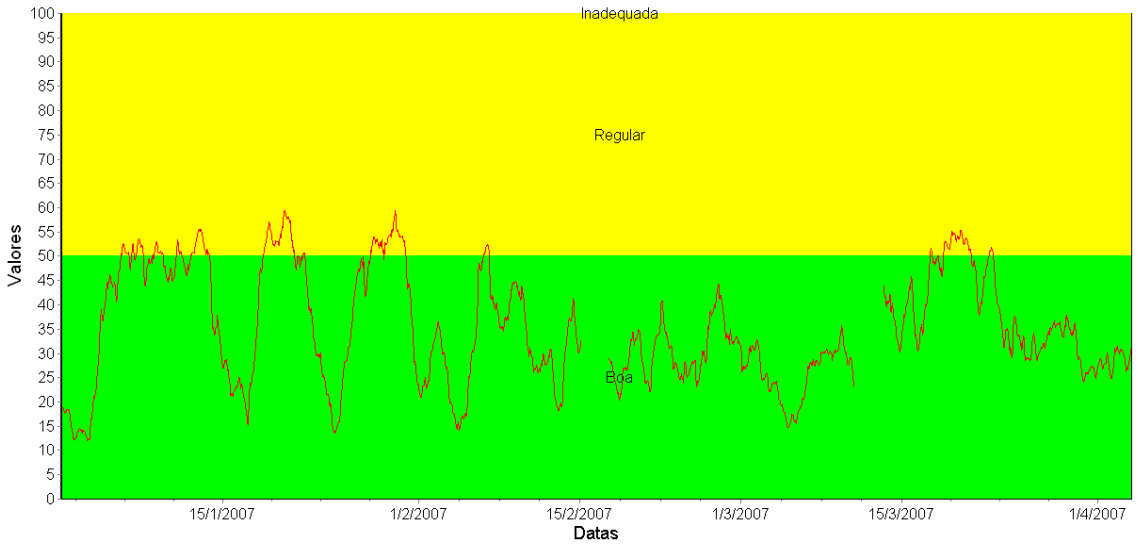

Figura 10 – Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Laranjeiras. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.

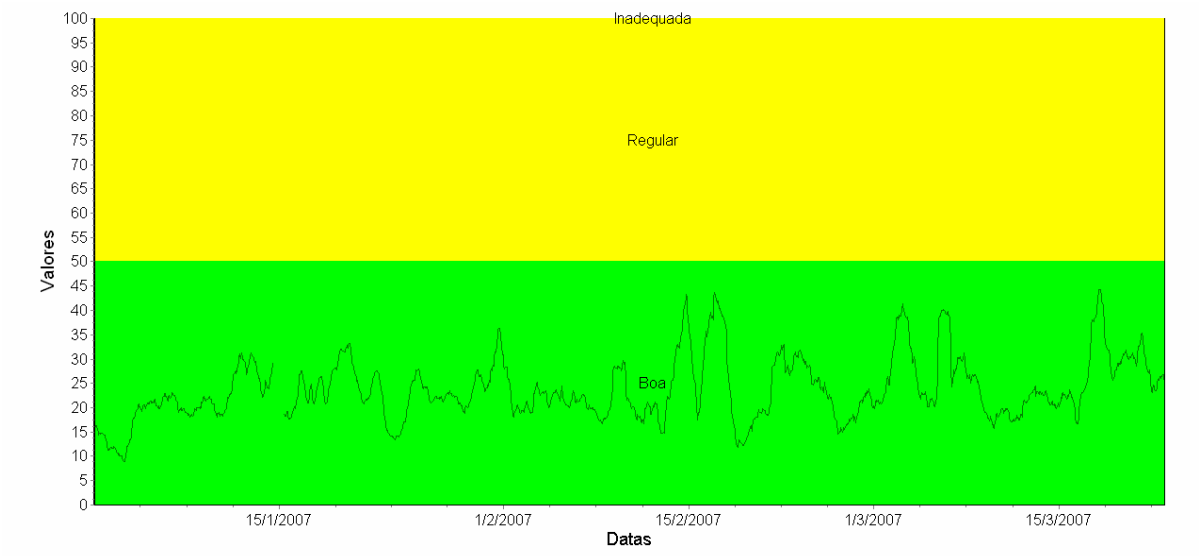

Figura 11 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Carapina. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.

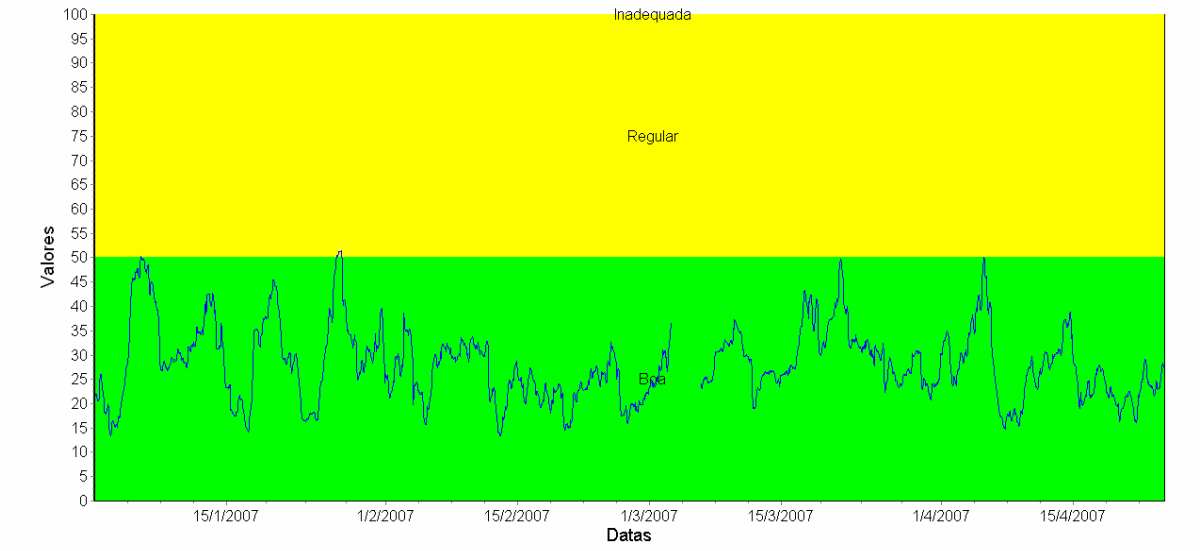

Figura 12 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Jardim Camburi. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.

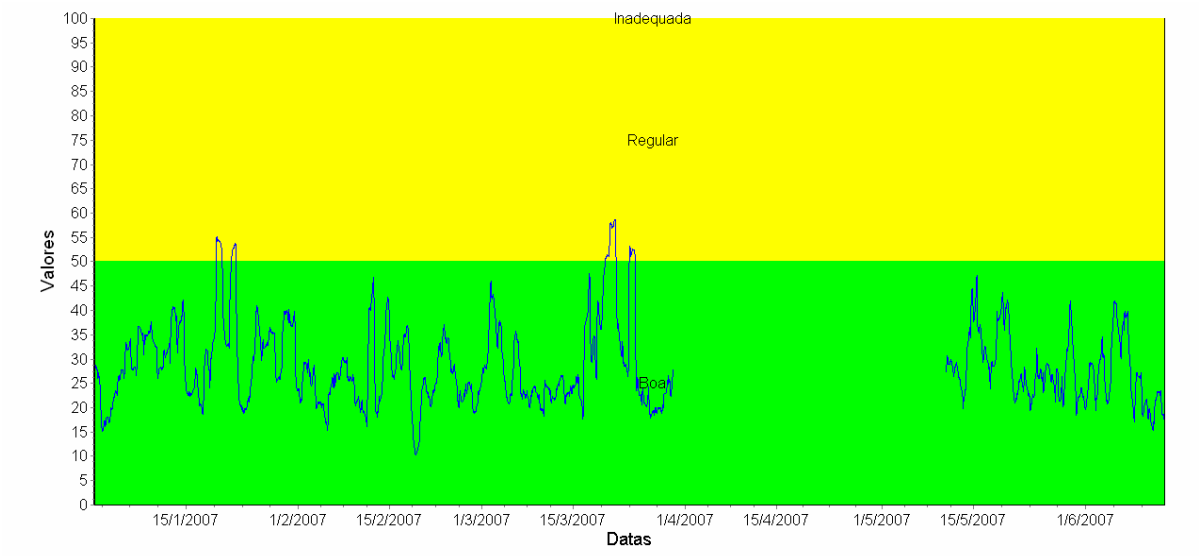

Figura 13 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Enseada do Suá. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.

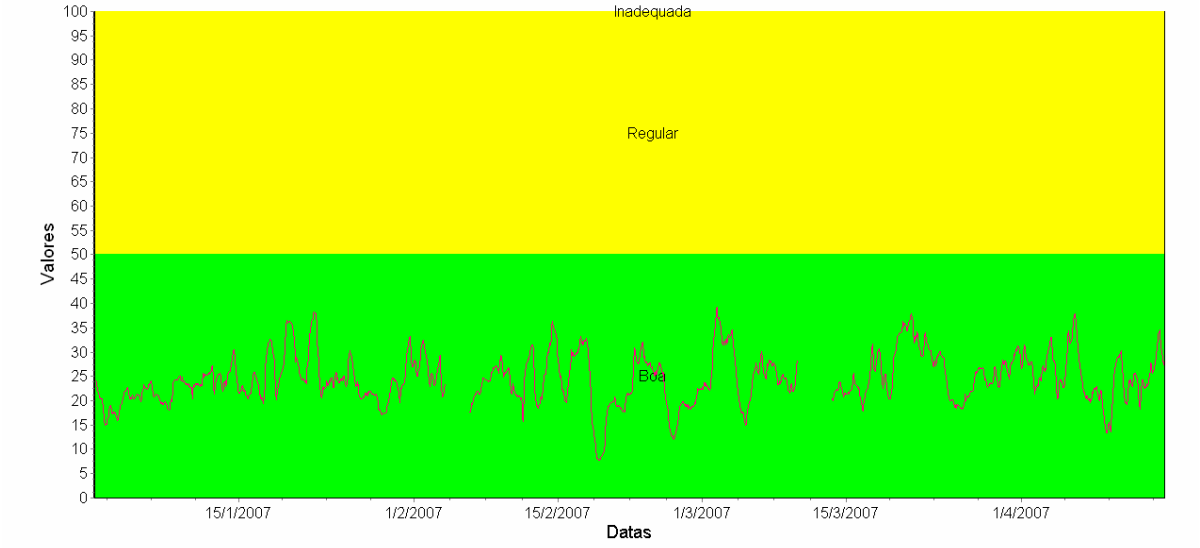

Figura 14 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Vitória Centro. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.

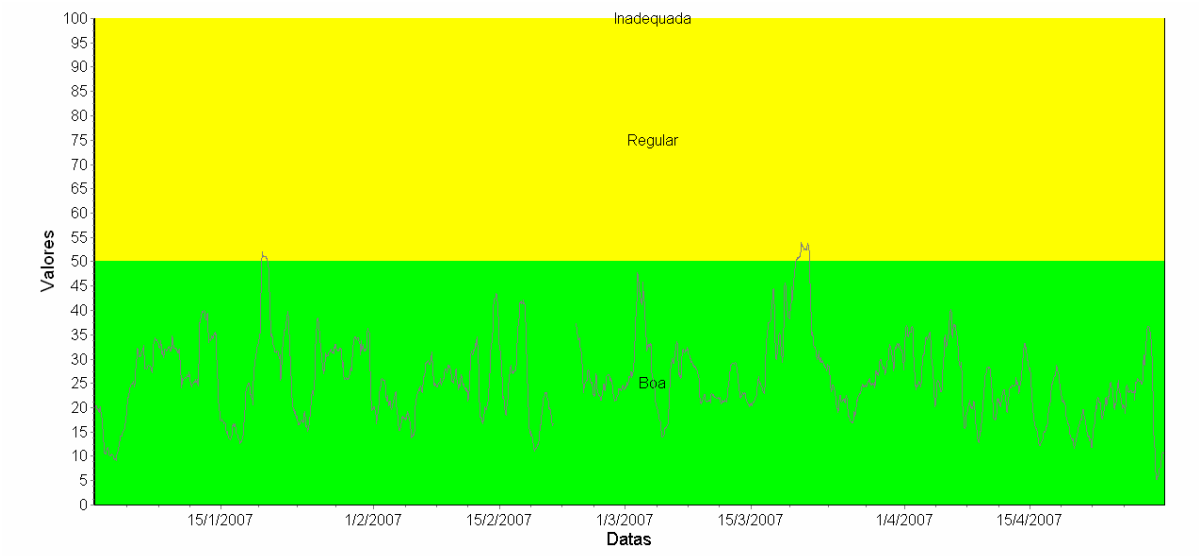

Figura 15 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Vila Velha Ibes. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.

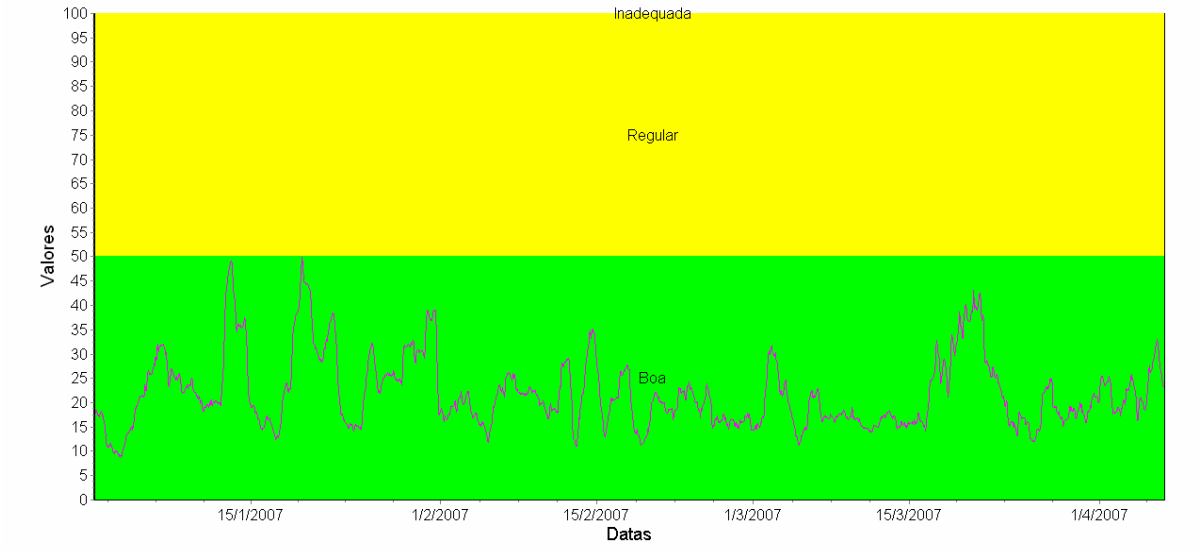

Figura 16 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Vila Velha Centro. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.

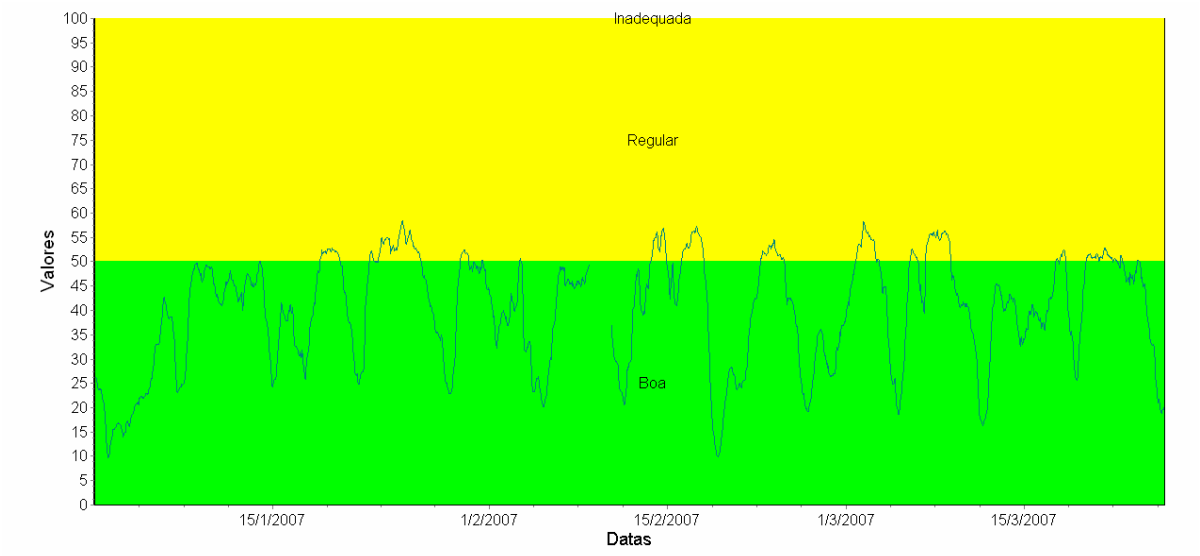

Figura 17 - Gráfico de evolução do IQA para o parâmetro PM_{10}, segundo as médias do mesmo. Estação Cariacica. Ano 2007. Fonte: IEMA, 2007.

5. METODOLOGIA

5.1. REDE AUTOMÁTICA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

A rede automática de monitoramento da qualidade do ar - RAMQAr - na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) é uma iniciativa do IEMA que visa controlar e conhecer o impacto causado pelas diversas fontes poluidoras da RGV.

Ela é composta por oito estações de monitoramento e possui equipamentos de medição de última geração. As estações fazem medidas de qualidade do ar e algumas delas também fazem medições meteorológicas, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros monitorados nas estações da RAMQAr. Fonte: IEMA, 2012.

Estação	PTS	PM_{10}	SO_2	CO	NO_X	HC	O_3	Meteorologia*
Estação Laranjeiras	■	■	■	■	■		■	
Estação Carapina	■	■						DV,VV,UR,PP,P,T,I
Estação Jardim Camburi	■	■	■		■			
Estação Enseada do Suá	■	■	■	■	■	■	■	DV,VV
Estação Vitória Centro	■	■	■	■	■	■		
Estação Ibes	■	■	■	■	■	■	■	DV,VV
Estação Vila Velha		■	■					
Estação Cariacica	■	■	■	■	■		■	DV,VV,T

*DV: Direção de Vento
VV: Velocidade do Vento
I: Insolação
PP: Precipitação Pluviométrica
UR: Umidade Relativa
P: Pressão

Os endereços de cada uma das estações são:

- Estação Laranjeiras: Hospital Dório Silva;
- Estação Carapina: ArcelorMittal - Av. Brig. Eduardo Gomes, S/N;
- Estação Jardim Camburi: Unidade de Saúde de Jardim Camburi
- Estação Enseada do Suá: Corpo de Bombeiros;
- Estação Vitória Centro: Prédio do Ministério da Fazenda;
- Estação Vila Velha Ibes: 4º Batalhão da Polícia Militar;
- Estação Vila Velha Centro: Av. Champagnat nº 911;
- Estação Cariacica: CDA (CEASA).

A Figura 18 apresenta as estações da RAMQAr.

Figura 18 - Estações da RAMQAr. Fonte: IEMA, 2012.

Os dados gerados nas estações são enviados de hora em hora por meio de linhas telefônicas para o Centro Supervisório do IEMA, o que proporciona uma ação rápida e eficaz de controle e fiscalização por parte do IEMA.

Esses dados são muito importantes para o projeto, uma vez que o desempenho de cada um dos modelos será avaliado pela comparação das concentrações calculadas com as concentrações medidas.

5.2. INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DA REGIÃO DA GRANDE VITÓRIA

O inventário de emissões atmosféricas da Região da Grande Vitória surgiu do Acordo de Cooperação Técnica firmado entre a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos e a empresa EcoSoft Consultoria e Softwares Ambientais.

O inventário abrange os municípios de Cariacica, Serra, Viana, Vila Velha e Vitória e sua metodologia seguiram os requisitos do protocolo do *Emission Inventory Improvement Program* (EIIP). A maior parte dos dados foram obtidos por meio de documentos de licenciamento ambiental e acompanhamento dos empreendimentos. Na ausência de dados de monitoramento ambiental, o inventário foi complementado conforme metodologia recomendada pelo EIIP utilizando principalmente o *Compilation of Air Pollutant Emission Factors* (AP42) da USEPA.

As fontes emissoras de poluentes foram divididas em emissões industriais, emissões veiculares, e emissões de atividades específicas, que por sua vez se dividem em emissões residenciais e comerciais; aterros sanitários; estocagem, transporte e comercialização de combustíveis; portos e aeroporto; e emissões biogênicas. A Figura 19 apresenta as fontes industriais documentadas no inventário, a Figura 20 mostra as vias de tráfego primárias documentadas e a Figura 21 exibe as vias de tráfego secundárias. A Figura 22 apresenta as emissões residenciais e comerciais, tomadas como áreas habitadas. A Figura 23 mostra os aterros sanitários existentes na RGV. A Figura 24 exibe postos de combustíveis inventariados. A Figura 25 apresenta os portos e aeroporto inventariados e, por fim, a Figura 26 mostra o cenário de emissões biogênicas da RGV.

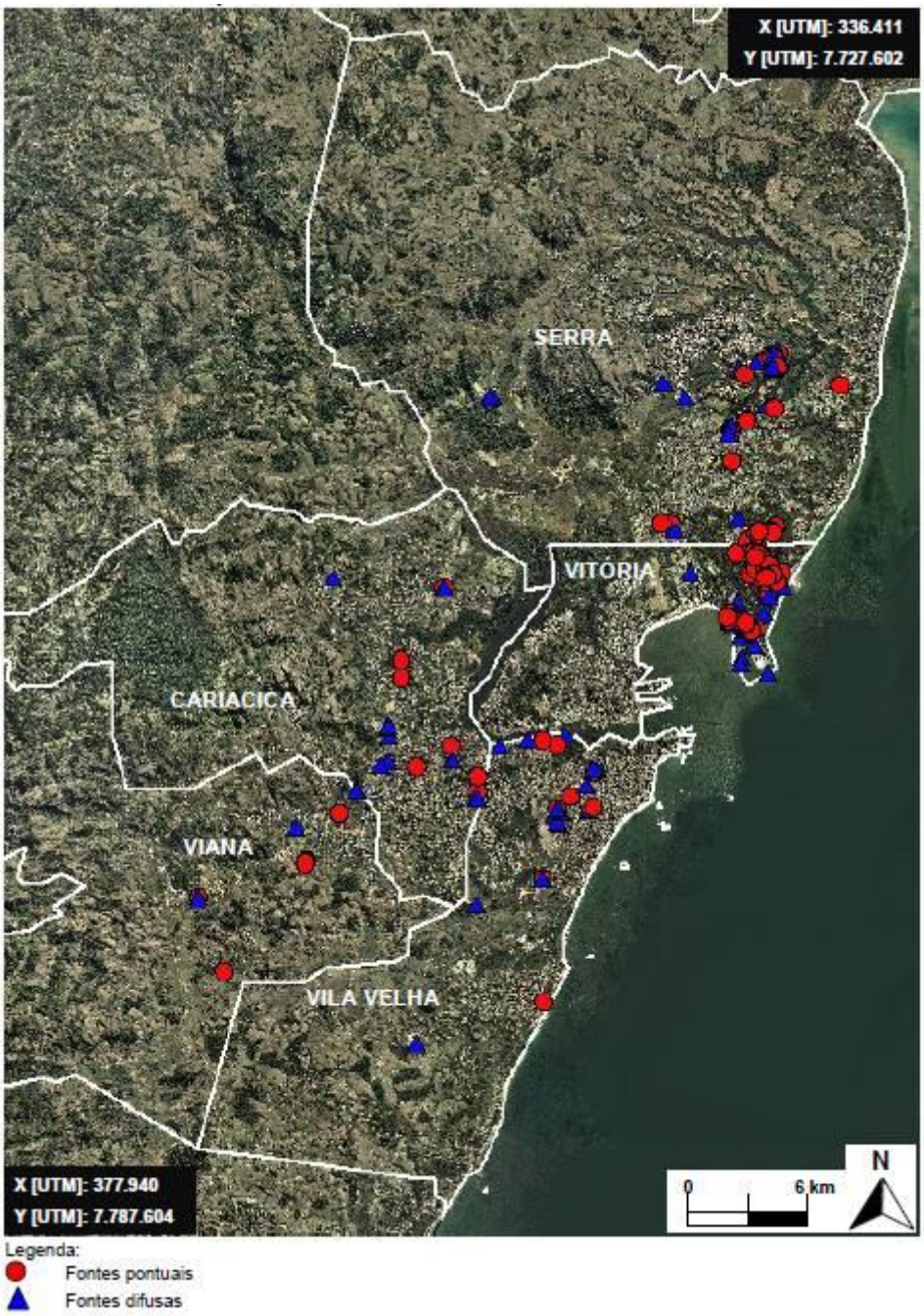

Figura 19 - Localização das fontes emissoras de origem industrial na RGV. Fonte: IEMA, 2011.

Figura 20 - Representação das vias de tráfego primárias da RGV. Fonte: IEMA, 2011.

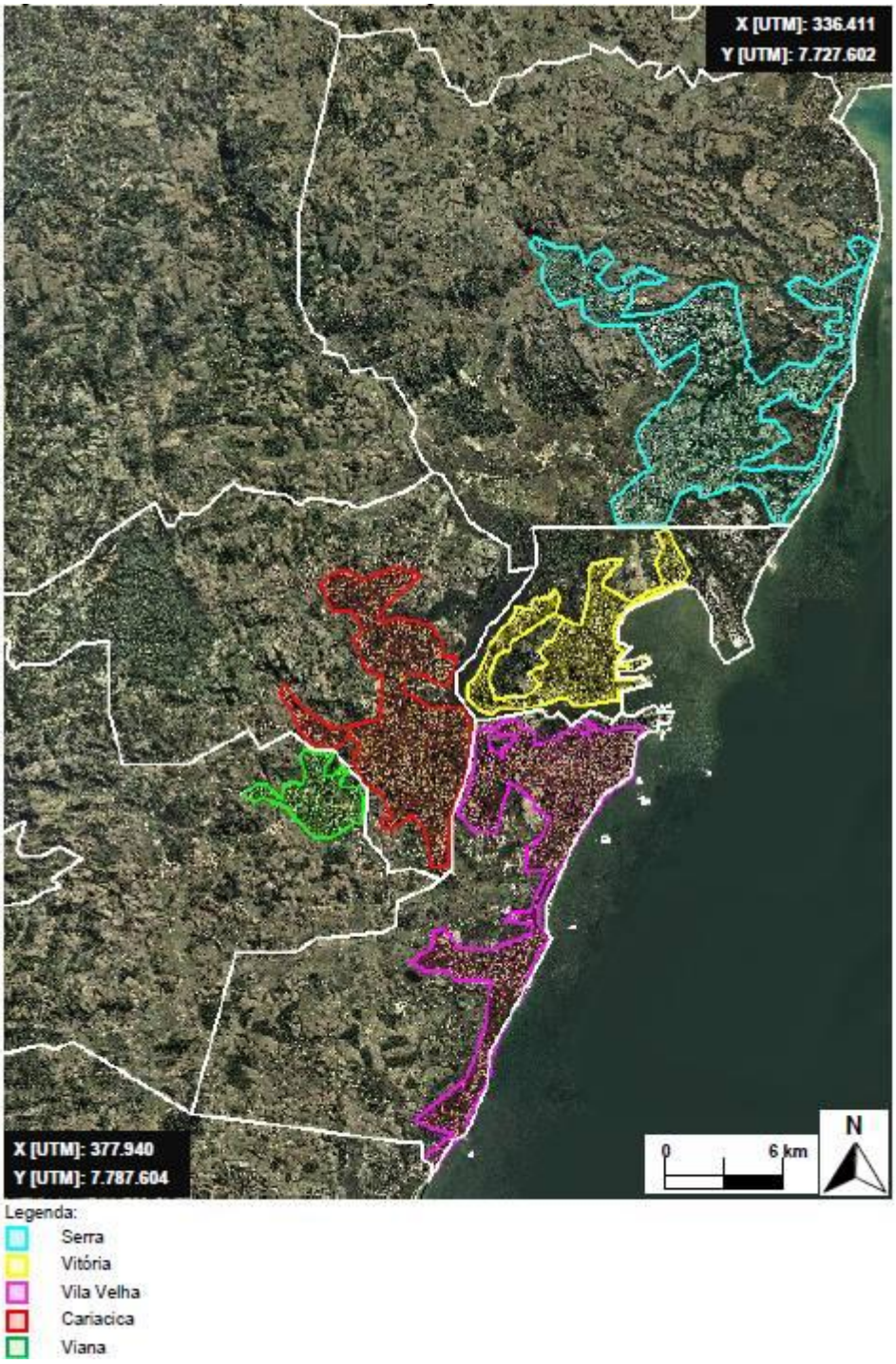

Figura 21 - Representação das vias de tráfego secundárias da RGV. Fonte: IEMA, 2011.

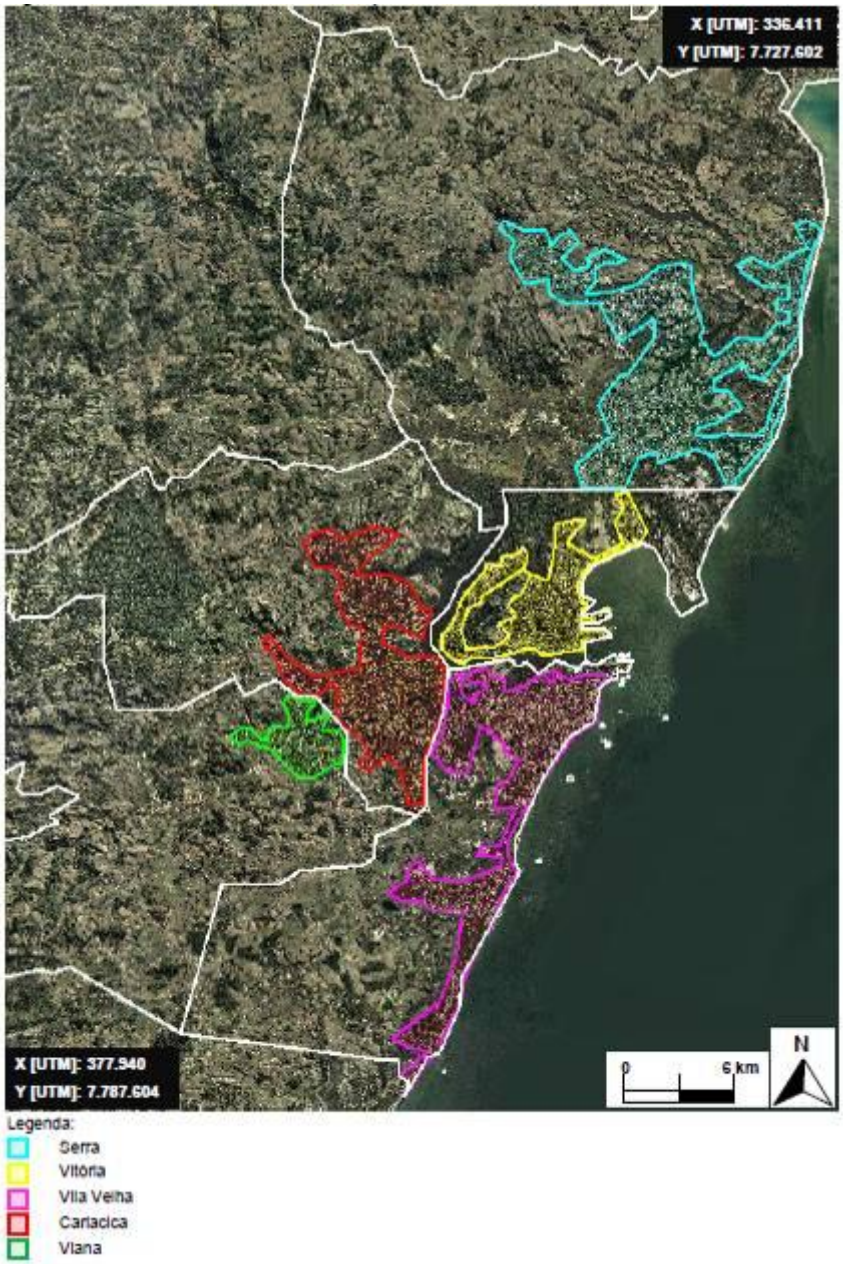

Figura 22 - Áreas habitadas dos municípios pertencentes à RGV. Fonte: IEMA, 2011.

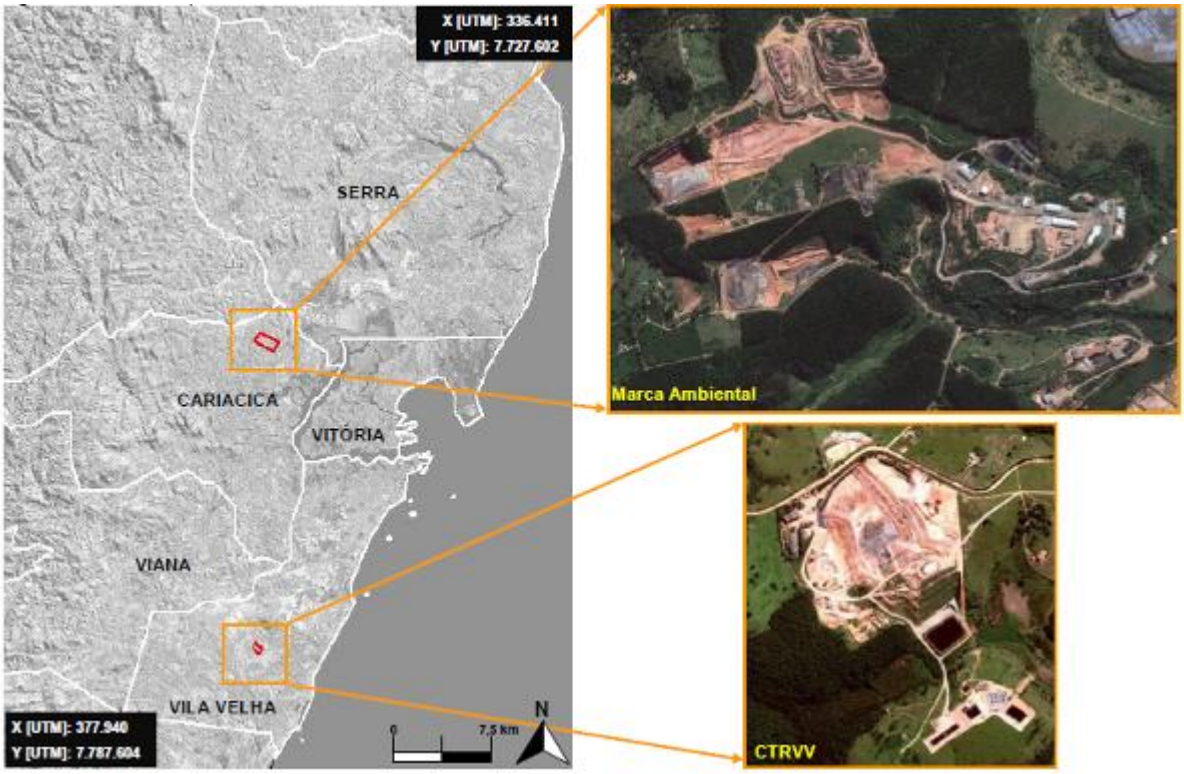

Figura 23 - Localização dos aterros sanitários existentes na RGV. Fonte: IEMA, 2011.

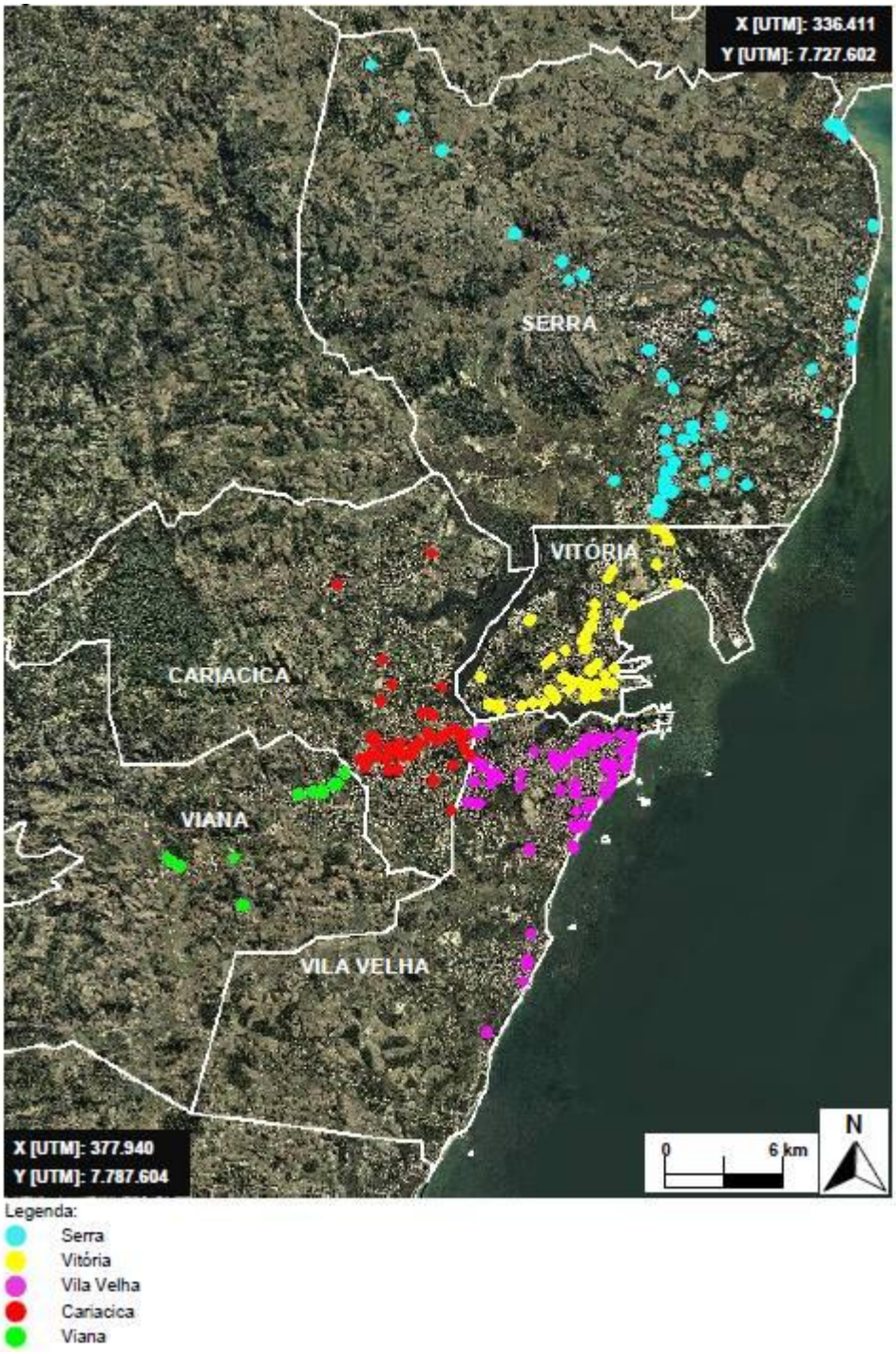

Figura 24 - Postos de combustíveis inventariados na RGV. Fonte: IEMA, 2011.

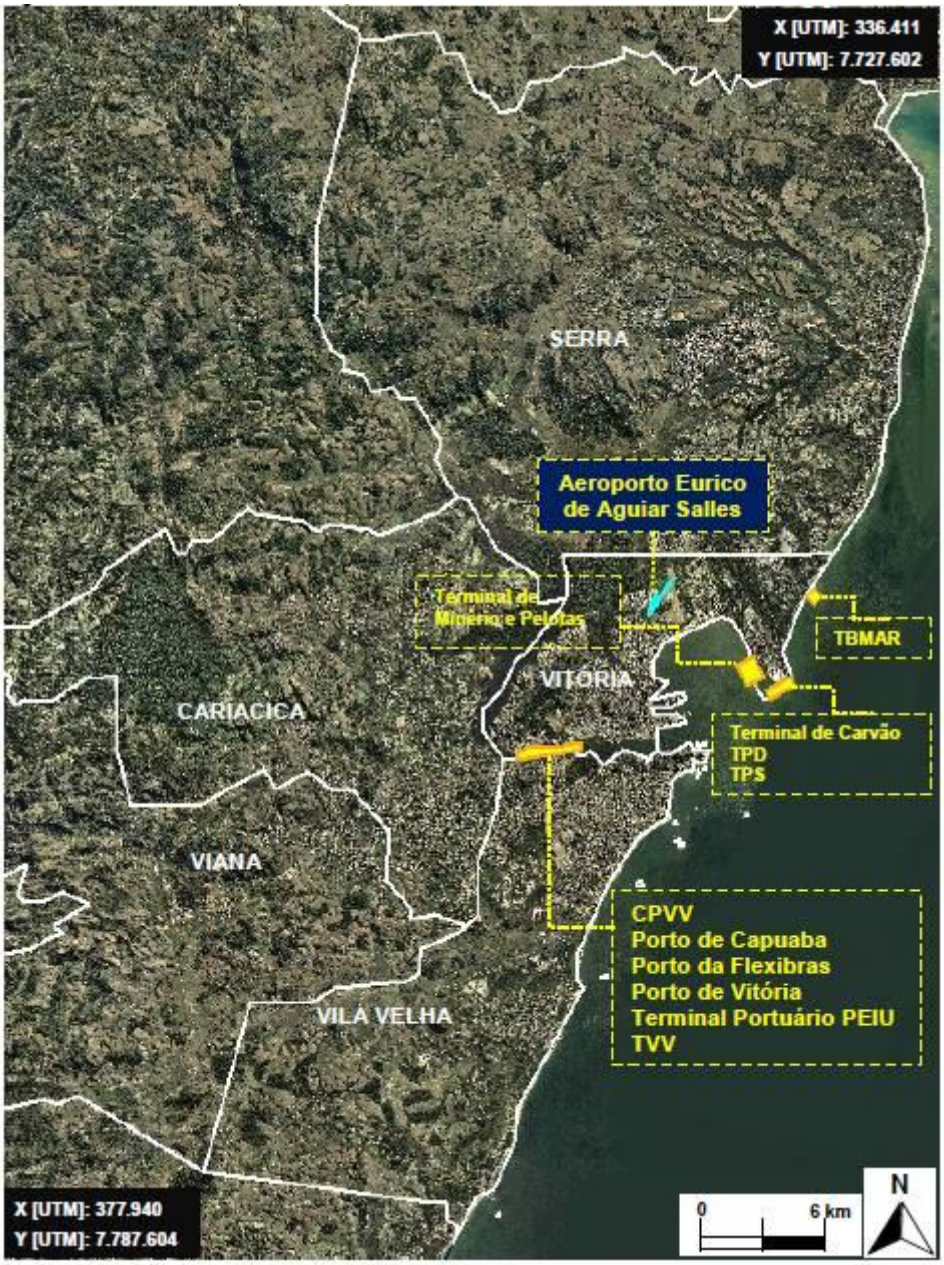

Figura 25 - Localização do aeroporto de Vitória e portos inventariados na RGV. Fonte: IEMA, 2011.

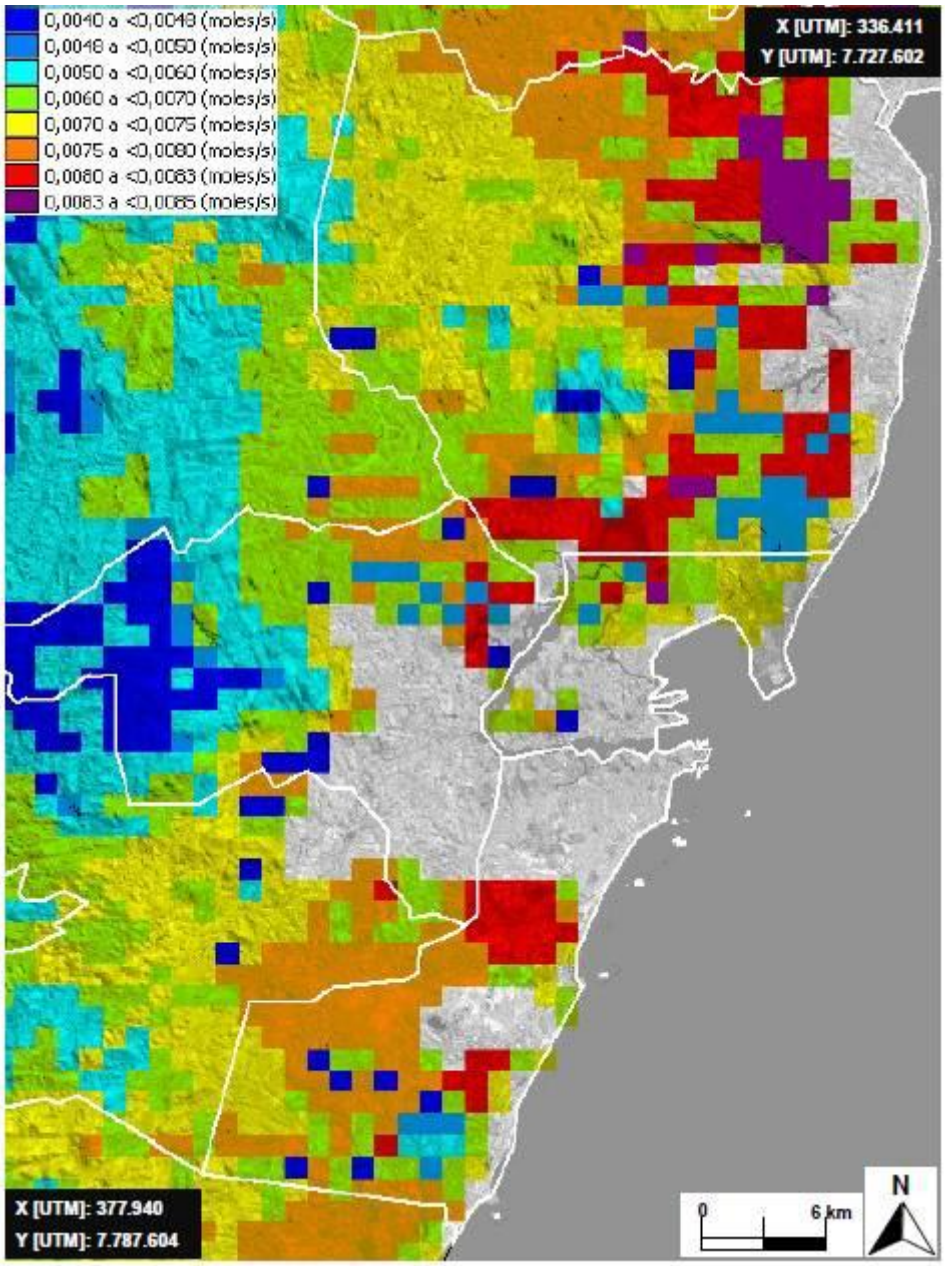

Figura 26 - Cenário de emissões biogênicas de compostos orgânicos voláteis na RGV. Fonte: IEMA, 2011.

Com relação às emissões veiculares, foram desenvolvidas funções horárias de tráfego para veículos leves e pesados. Como mostra a Tabela 9, 66% da frota é composta de veículos que usam a gasolina como combustível, nos quais a maioria é composta de veículos leves. Dessa maneira, optou-se por considerar apenas veículos leves no desenvolvimento da modelagem. As Figuras 27, 28 e 29 mostram as funções de tráfego horária, semanal e mensal para veículos leves, respectivamente.

Tabela 9 - Fracionamento da frota de veículos da RGV por tipo de combustível. Fonte: IEMA, 2011.

Fração da Frota por Tipo de Combustível [%]				
Gasolina	Álcool	Flex	GNV	Óleo Diesel
66	5	15	3	11

Figura 27 - Função de tráfego horária para veículos leves. Fonte: IEMA, 2011.

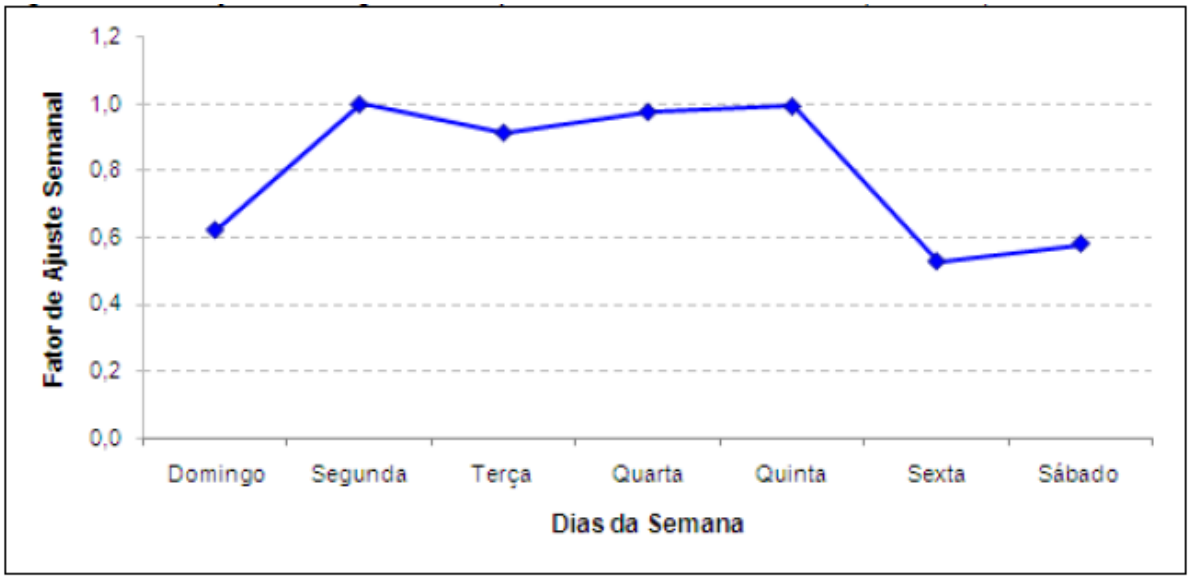

Figura 28 - Função de tráfego semanal para veículos leves. Fonte: IEMA, 2011.

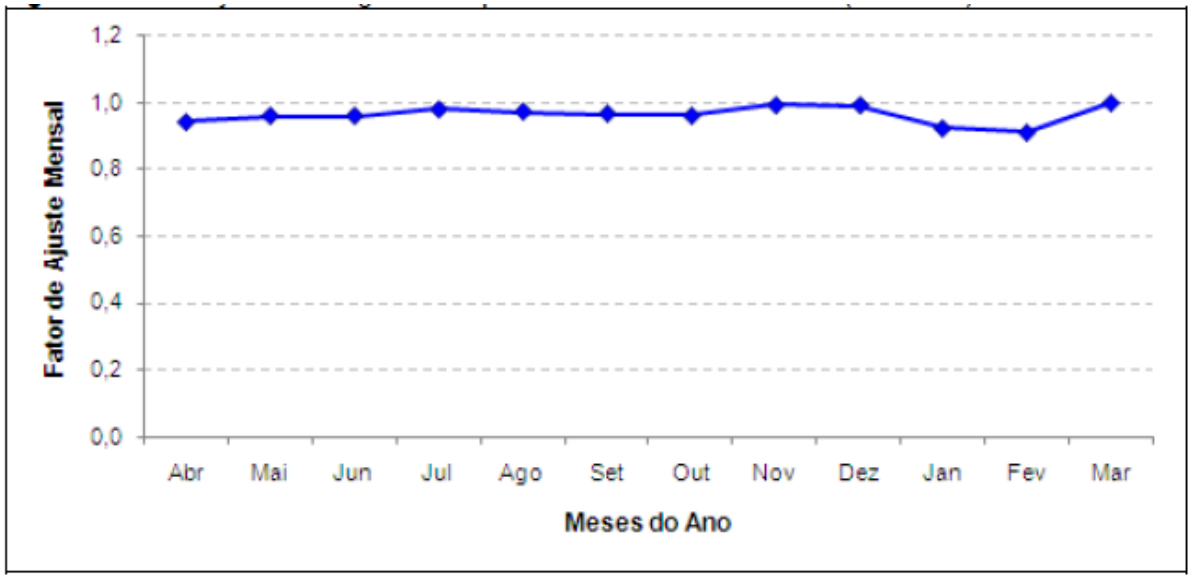

Figura 29 - Função de tráfego mensal para veículos leves. Fonte: IEMA, 2011.

As fontes emissoras de PM_{10} utilizadas no estudo serão aquelas existentes no inventário.

5.3. DOMÍNIO DE ESTUDO

O critério para escolha do domínio de estudo foi que todas as fontes emissoras de poluentes inventariadas e todas as estações de monitoramento da RAMQAr estivessem envolvidas. A cidade de Vitória, sendo a maior contribuidora de fontes, encontra-se localizada próximo ao centro da malha. Dessa maneira, optou-se por um domínio retangular cujas coordenadas dos pontos inferior esquerdo e superior direito são, respectivamente:

- 20.521580° S 40.582484° O
- 19.911580° S 40.099831° O

A malha computacional utilizada para o domínio possui um espaçamento de 1 km, com dimensão total de 50x70 km. A escolha da malha levou em consideração as premissas levantadas acima. Procurou-se também evitar a condição de fontes próximas aos extremos da malha, pois estas situações poderiam gerar interferências devido ao fenômeno no qual o poluente é carregado para fora da área computacional, e posteriormente retorna. A Figura 30 apresenta o domínio escolhido.

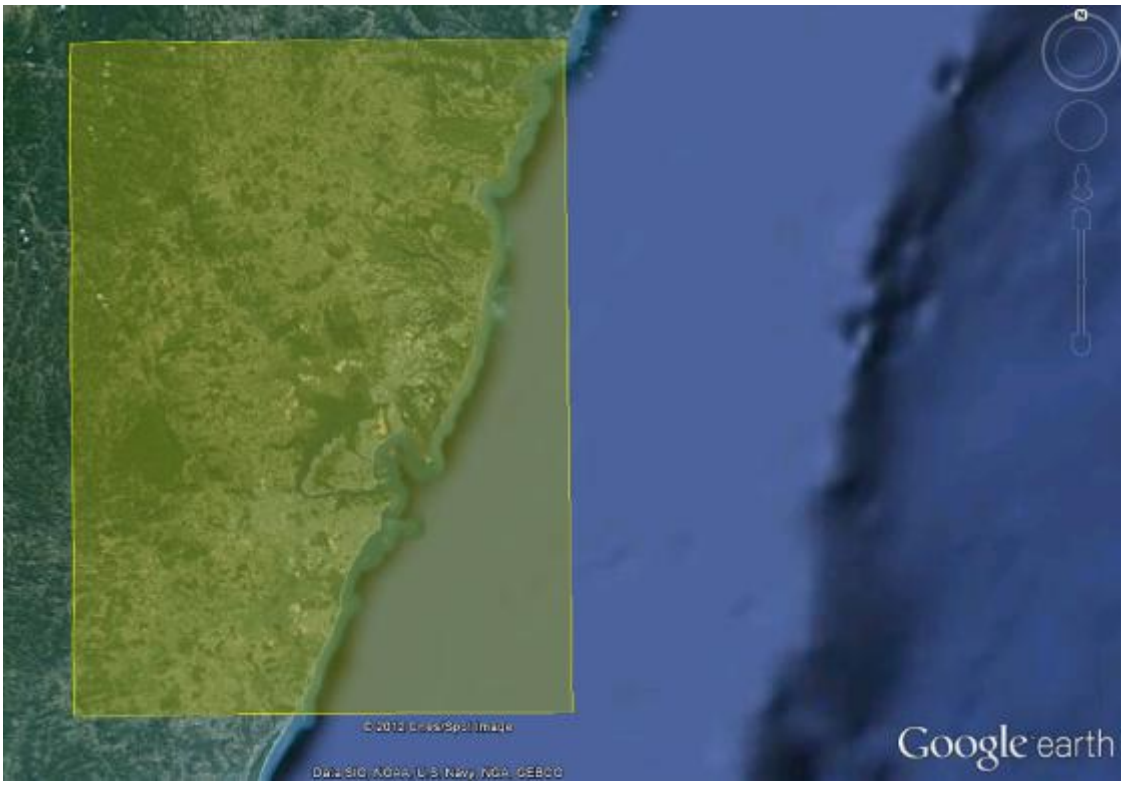

Figura 30 - Domínio de estudo.

5.4. MODELAGEM DAS FONTES

As fontes foram obtidas através do Inventário de Fontes da Região Metropolitana da Grande Vitória do ano de 2010. A partir destes dados elaborou-se uma divisão por tipo de fonte. É importante mencionar que, como a modelagem contemplou apenas a dispersão de PM_{10}, foram utilizadas apenas as fontes que possuíam taxas de emissão deste poluente. As fontes foram então separadas em quatro grupos: fontes pontuais; fontes de área; fontes volumétricas; e fontes de linha. As fontes do tipo linha não foram modeladas como tal, pois apenas o CALPUFF, e não o AERMOD (exceto por uma aproximação de linhas como pequenos volumes), possui essa caracterização de fonte. A explicação da modelagem por cada tipo de fonte é realizada a seguir.

5.6.1. FONTES PONTUAIS

As fontes pontuais são definidas como fontes similares a um ponto, na qual a área de emissão não é muito significativa, tal como chaminés. No inventário de 2010 da RMGV as fontes com maior contribuição de PM_{10} são as chaminés principais das empresas Vale e ArcelorMittal, sendo a fonte pontual com maior fator de emissão o precipitador eletrostático da ArcelorMittal Tubarão.

As coordenadas fornecidas para as fontes pontuais correspondem ao único ponto fornecido pelo inventário. Ambos os modelos possuem como dados de entrada das fontes pontuais os seguintes parâmetros: altura de emissão acima do solo, temperatura de saída do gás da chaminé, a velocidade de saída do gás e o diâmetro de saída da chaminé.

5.6.2. FONTES VOLUMÉTRICAS

As fontes volumétricas são consideradas fontes de pequenas dimensões que são melhor interpretadas em três dimensões, tal como transferência entre correias transportadoras, armazenagem de matéria prima em pilhas, descarregamento de caminhões, entre outras.

A modelagem das fontes volumétricas é feita com base nos pontos fornecidos pelo Inventário de Emissões Atmosféricas e a altura da fonte emissora. A Figura 31 mostra como é feita a modelagem de uma fonte volumétrica, no caso, um empilhamento.

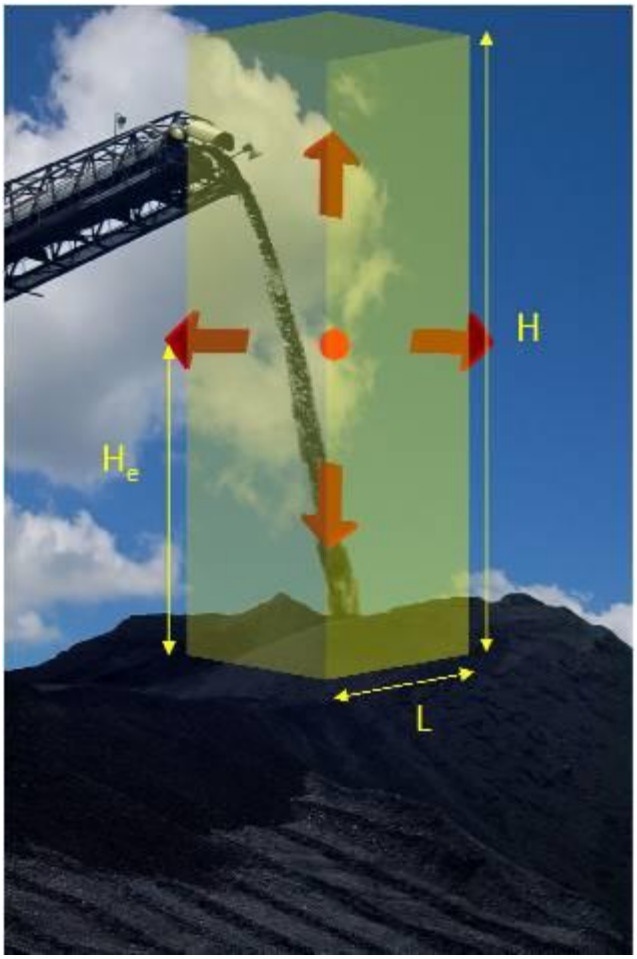

Figura 31 – Modelagem de fonte volumétrica. Fonte: Silva e Sarnáglia, 2010.

Os modelos AERMOD e CALPUFF exigem como entrada de dados as dimensões iniciais da pluma. Essa dimensão é calculada conforme tabelas fornecidas pelos próprios modelos e seu cálculo é apresentado na Tabela 10. Conforme Silva e Sarnaglia (2010), fontes com altura efetiva superior a dez metros foram adotadas como fontes elevadas e fontes com altura inferior a dez metros foram consideradas como fontes ao nível do solo.

Tabela 10 - Dimensões iniciais da pluma. Fonte: EPA, 2004.

Tipo de Fonte	**Procedimento para obtenção da dimensão inicial**
Dimensão lateral inicial	
Fonte volumétrica única	Comprimento do lado dividido por 4,3
Fonte linha representada por fontes volumétricas adjacentes	Comprimento do lado dividido por 2,15
Fonte linha representada por fontes volumétricas separadas	Distância entre centros dividida por 2,15
Dimensão vertical inicial	
Fonte baseada no solo ($h_{\downarrow}e \cong 0$)	Dimensão vertical da fonte dividida por 2,15
Fonte elevada ($h_{\downarrow}e > 0$) em uma edificação	Altura da edificação dividida por 2,15
Fonte elevada ($h_{\downarrow}e > 0$) que não esteja em uma edificação	Dimensão vertical da fonte dividida por 4,3

5.6.3. FONTES SUPERFICIAIS

As fontes de área utilizadas são referentes principalmente às emissões residenciais e comerciais. As coordenadas fornecidas pelo inventário de fontes para as fontes de área representam a coordenada de dois dos vértices.

Dessa maneira, optou-se por modelar as fontes superficiais como retângulos, adotando os pontos fornecidos pelo Inventário de Emissões Atmosféricas como as coordenadas geográficas dos vértices inferior esquerdo e superior direito, respectivamente. Para o cálculo das dimensões iniciais da pluma, os dados da Tabela 10 foram utilizados.

No caso do modelo CALPUFF, a simulação inicial com essas fontes alcançou valores extremamente altos de concentração de PM10 quando comparado com a emissão dos

outros tipos de fontes. Para contorno dessa anomalia, as fontes superficiais foram divididas, de forma que a extensão máxima do maior lado do retângulo após a divisão posssuísse dimensão máxima entre 500 metros e 1 km. Entretanto, os valores obtidos de concentração de PM10 permaneceram muito elevados quando comparadas as concentrações obtidas pelas outras fontes, com alcance de concentrações 1000 vezes superiores. Dessa forma, as fontes de emissões residenciais e comerciais, equivalentes a sete fontes do Inventário da RMGV de 2010, não foram contempladas na modelagem do CALPUFF para este estudo.

5.6.4 FONTES LINEARES

Fontes lineares são aquelas em que duas das três dimensões da fonte emissora é desprezível, no caso a altura, e a outra chamada de largura. Essas fontes geralmente correspondem, em centros urbanos, a vias de tráfego e por isso, são geralmente variáveis no tempo.

As fontes linha foram modeladas como paralelogramos no modelo AERMOD, com base nos dois pontos fornecidos e a largura das vias. Dessa maneira, como mostra a Figura 32, onde a largura da via foi exagerada apenas para demonstrar a figura geométrica utilizada, utilizou-se os dois pontos fornecidos pelo inventário e, tomando a largura da via, também fornecida, modelou-se a fonte linha como uma fonte área.

Para o CALPUFF, as fontes lineares foram mantidas como fontes de linha, pois a modelagem dessas fontes como fontes de área obteve valores de concentração de PM10 muito elevados quando comparados à modelagem realizada como fonte de linha pelo CALPUFF, à modelagem realizada como fonte de área pelo AERMOD, e o medido nas estações de monitoramento

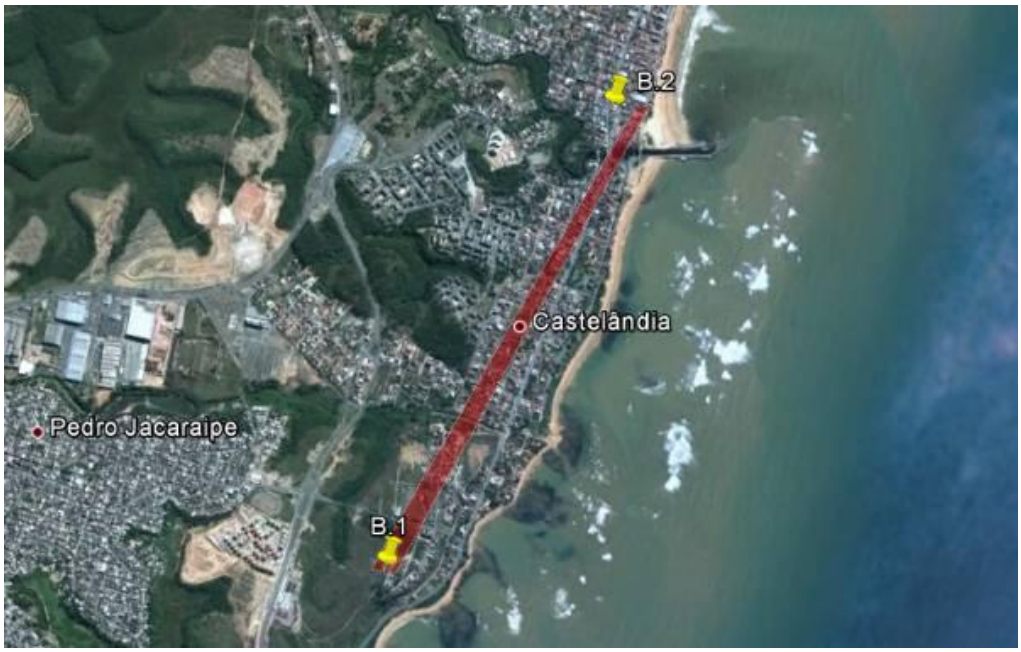

Figura 32 - Exemplo de modelagem de fontes linhas.

5.6.5. RECEPTORES

No modelo AERMOD e no modelo CALPUFF é possível optar por uma grade retangular de receptores, uma grade polar de receptores ou receptores discretos. Essa última opção foi utilizada visando diminuir o esforço computacional ao executar o modelo.

Os receptores discretos utilizados foram as coordenadas geográficas referentes as estações componentes da Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar (RAMQAr) Da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV).

5.5. O MODELO AERMOD

O AERMOD (AERMIC *Model*) é um modelo baseado em pluma Gaussiana de estado estacionário desenvolvido para estimar concentrações de poluentes atmosféricos no campo próximo de uma variedade de fontes industriais (Barrat, 2001).

O modelo surgiu pela colaboração entre a Sociedade Americana de Meteorologia (AMS - *American Meteorological Society*) e a EPA, através do *AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee*, AERMIC, com o objetivo de desenvolver um modelo de dispersão para fins regulatórios que envolvesse conceitos da camada limite planetária (EPA, 2004a).

As premissas básicas levadas em consideração no desenvolvimento do modelo foram:

- Robustez na estimativa de concentrações para fins regulatórios, fornecendo estimativas razoáveis de concentração em diversas condições com descontinuidades mínimas;
- Facilidade na implementação, com requisitos de entrada razoáveis, assim como recursos computacionais;
- Fundamentação na ciência atual utilizando em sua essência o processo físico; e
- Facilidade de revisão frente à evolução científica.

O modelo consiste de uma interface meteorológica que processa perfis verticais de vento, temperatura e turbulência, incluindo algoritmos de dispersão para a camada limite convectiva diurna e para a camada limite estável noturna. Emissões de superfície, próxima à superfície e de fontes elevadas também são tratadas, assim como terrenos complexos.

Existem dois pré-processadores regulatórios usados pelo AERMOD: o AERMET, um pré-processador de dados meteorológicos que incorpora dispersão atmosférica baseado na estrutura turbulenta da camada limite planetária e conceitos de escala; e o AERMAP, um pré-processador de terreno que incorpora dados de terrenos complexos (EPA, 2011).

5.5.1. AERMET

O AERMET é um pré-processador capaz de processar e organizar dados meteorológicos provenientes de estações meteorológicas e transformá-los em um formato adequado a ser utilizado pelo AERMOD (EPA, 2004d). O programa gera dois arquivos: um arquivo de dados de superfície e outro arquivos de dados de perfis verticais (EPA, 2011).

O propósito básico do AERMET é usar os dados meteorológicos, representativos do domínio de estudo e computar alguns parâmetros da camada limite de modo a estimar perfis verticais de vento, turbulência e temperatura (EPA, 2004b).

Existem três etapas no processamento dos dados. A primeira etapa extrai os dados meteorológicos dos arquivos de entrada fornecidos pelo usuário e os processa fazendo verificações com relação à qualidade dos dados. A segunda etapa junta todos os dados

disponíveis para períodos de vinte e quatro horas e armazena esses dados em um único arquivo. Finalmente a terceira etapa lê esse arquivo e estima os parâmetros necessários para a camada limite a serem usados pelo AERMOD (EPA, 2004b).

Os arquivos de entrada para cada uma das etapas é apresentada nos anexos I, II e III, respectivamente. O arquivo contendo os dados meteorológicos é muito grande, dada a grande quantidade de dados meteorológicos medidos (de hora em hora, ao longo de um ano). No entanto, gráficos contendo dos dados são apresentados no anexo IV.

No arquivo apresentado no anexo I os itens de maior relevância são os campos XDATES, onde o domínio de tempo da modelagem é especificado; LOCATION, as coordenadas geográficas da estação meteorológica são apresentadas juntamente com uma identificação para o caso da utilização de uma das estações do *National Weather Service*, NWS, ser utilizado. Como não é o caso, foi atribuída a identificação 99999 para a estação utilizada. A estação de referência é a estação de Carapina da RAMQAr.

O campo OSHEIGHTS determina a altura em relação ao nível do solo em que as medições são feitas. O campo READ informa quais são os parâmetros fornecidos no arquivo de dados meteorológicos. Neste caso, a estação Carapina fornece dados de precipitação, pressão atmosférica, insolação, umidade relativa, velocidade e direção do vento e temperatura. O modelo, no entanto, exige o dado da altura de camada de mistura.

O valor da altura de camada de mistura foi determinado conforme trabalho desenvolvido por Seibert e outros autores (1997). No trabalho os autores descrevem vários teorias e métodos para se obter a altura da camada de mistura a partir de medidas meteorológicas, incluindo rotinas computacionais.

De acordo com os autores, uma equação bastante prática para a determinação aproximada da altura de mistura e que não se baseia em coeficientes empíricos obtidos para locais específicos é:

$$h = \pi \sqrt{\frac{2\kappa\, u_* z_r}{f}}, com\ z_r = 1{,}25\ m \qquad (1)$$

Onde κ é a constante de von-Kármán ($\kappa \cong 0{,}40$), u_* é a velocidade de fricção, f é o coeficiente de Coriolis e z_r é um coeficiente usado para calcular a viscosidade de vórtices.

Segundo os autores a velocidade de fricção pode ser aproximada pela velocidade do vento, enquanto o coeficiente de Coriolis é calculado como:

$$f = 2\omega \, sen(\varphi) \tag{2}$$

Onde ω é a velocidade angular de rotação da Terra e φ a latitude do local.

Por fim os campos AUDIT e RANGE determinam quais variáveis devem ser verificadas e qual o intervalo de valores aceitáveis, respectivamente. É interessante lembrar que nos dias em que não houve medição, tais valores foram especificados como valores muito grandes de modo que estivessem fora do intervalo aceitável especificado para o programa. O campo THRESHOLD determina a velocidade mínima de vento, abaixo da qual é considerada calmaria para fins de dispersão e está relacionada à precisão dos equipamentos que fazem as medidas.

O arquivo de entrada do segundo estágio do AERMET apenas especifica o arquivo proveniente da primeira etapa, além de dizer o domínio de tempo da modelagem, através do campo XDATES.

O arquivo de entrada da terceira etapa do AERMET possui, além do campo LOCATION que especifica as coordenadas geográficas da estação, um campo SITE_CHAR que especifica o albedo (fração da radiação solar incidente que é refletida de volta ao espaço sem absorção), a taxa de Bowen (taxa entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente usado para determinar os parâmetros da camada limite planetária para condições de convecção), e o comprimento de rugosidade da superfície.

O valor de albedo de 0,15 foi escolhido com base na tabela fornecida (Tabela 4-1) no próprio manual do usuário do AERMET que especifica, para um ambiente urbano, os

valores de 0,14 para a primavera e 0,16 para o verão. Como a Região Metropolitana da Grande Vitória possui um clima estável durante todo o ano, com estações parecidas, tomou-se a média dos dois valores.

O valor de 2,00 foi escolhido para a taxa de Bowen conforme as tabelas fornecidas no manual de usuário do AERMET (Tabelas 4-2a e 4-2b) que mostram, para um ambiente urbano, um valor de 2,0 para a estação da primavera, em condições secas, e o mesmo valor para o verão e o outono em condições úmidas.

O valor de comprimento de rugosidade da superfície foi obtido segundo o Atlas de Ventos Europeu (1989) que recomenda, para grandes cidades com prédios altos um valor de noventa centímetros.

5.5.2. AERMAP

O AERMAP é um pré-processador do AERMOD que usa dados de terreno para modelar a influência do terreno no fluxo atmosférico (Barrat, 2001). Os dados de elevação da saída do AERMAP são formatados de modo a serem diretamente utilizados pelo AERMOD. Esses dados de elevação são usados pelo AERMOD para o cálculo da concentração de poluentes.

O modelo determina a elevação base de cada um dos receptores e cada uma das fontes. Ele também procura pela altura do terreno e a localidade que possui maior influência na dispersão para cada receptor individualmente. Essa altura é chamada de escala de altura de colina (*hill height scale*) (EPA, 2004c).

O arquivo de entrada utilizado no AERMAP, com apenas algumas fontes, é apresentado no anexo V. Os campos que merecem destaque são descritos a seguir.

Os campos DATATYPE e DATAFILE identificam o tipo de arquivo contendo os dados de terreno e o nome do arquivo a serem utilizados. Neste caso foram utilizados dados da *United States Geological Survery*, USGS, uma agência científica americana que estuda o terreno. No sítio virtual disponível, foi escolhido um domínio de arquivo que contivesse o domínio da modelagem.

O campo DOMAINXY é o domínio escolhido para a modelagem. Mais uma vez, foi escolhido um domínio maior do que o domínio previamente definido, de modo a envolver toda a área escolhida. O campo ANCHORXY por sua vez, relaciona o domínio a coordenadas quaisquer escolhidas pelo usuário. Neste caso, optou-se por escolher a mesma referência geográfica, para que as fontes e o receptor pudessem ser descritos por suas coordenadas geográficas verdadeiras.

O campo LOCATION determina a localidade de cada fonte. O AERMAP permite a modelagem de três tipos de fontes, fontes pontuais, fontes de volume e fontes de área. As fontes de área, por sua vez, podem ser modeladas como retângulos, polígonos de até vinte vértices ou círculos. Optou-se por modelar as fontes área como polígonos de quatro lados, assim como as fontes linhas, com base nas coordenadas geográficas fornecidas pelo inventário.

As coordenadas fornecidas para as fontes volumétricas correspondem ao ponto do vértice inferior esquerdo da fonte emissora, enquanto a coordenada fornecida para as fontes área representa a coordenada de um dos vértices. Foram fornecidos também dados de elevação da fonte sobre o nível do mar para as fontes mencionadas acima. As coordenadas das fontes móveis fornecia dois pontos, sendo estes os dois extremos da via em si. A altura fornecida é a elevação da emissão em relação ao nível do solo.

Por fim o campo DISCCART determina a localização do único receptor utilizado. Neste caso foram fornecidas as coordenadas geográficas das estações de monitoramento da qualidade do ar da RAMQAr que serão utilizadas para a comparação dos dados do modelo. Podem ainda ser estabelecidos domínios cartesianos ou polares. Estes porém não foram incluídos para reduzir o tempo de processamento computacional.

5.5.3. AERMOD

O arquivo de entrada utilizado no AERMOD contendo apenas algumas fontes é apresentado no anexo VI e a descrição de alguns campos é fornecida a seguir.

O campo MODELOPT determina as opções do modelo. Nesse caso, a configuração de CONC informa ao modelo que ele deve fazer cálculos de concentração enquanto a opção NOCHKD informa que não deve ser feita a checagem de medições meteorológicas

ausentes, isso porque, para fins regulatórios, uma ausência de mais de dez por cento, invalida o trabalho.

O campo AVERTIME informa o tempo no qual o programa deve calcular as médias de concentração. No projeto em questão, o modelo calcula médias de concentração a cada hora e uma média anual.

Na especificação das fontes, os campos LOCATION são os mesmos descritos no AERMAP e, por isso, não serão discutidos novamente. O campo SRCPARAM especifica as características de cada uma das fontes. Para as fontes pontuais, os valores que se seguem correspondem à identificação da fonte, a taxa de emissão do poluente, a altura da emissão acima do solo, a temperatura de saída do gás da chaminé, a velocidade de saída do gás da chaminé e o diâmetro interno da chaminé.

Para as fontes de volume, os valores correspondem à identificação da fonte, a taxa de emissão do poluente, a altura da emissão acima do solo, a dimensão lateral inicial da pluma e a dimensão vertical inicial da pluma.

Para as fontes de área, valores correspondem à identificação da fonte, a taxa de emissão por unidade de área, a altura da emissão acima do solo e o número de vértices do polígono (no caso, quatro). Para as fontes de área ainda é preciso especificar as coordenadas geográficas de cada um dos vértices os quais são descritos através do campo AREAVERT.

Os outros campos incluem o nome dos arquivos provenientes dos pré-processadores AERMAP e AERMET. O último campo especifica o formato dos dados de saída. Neste caso o campo DAYTABLE 1 informa ao modelo que ele deve formatar um arquivo de saída contendo as concentrações do poluente especificado em cada dia, com um intervalo de uma hora.

Além do arquivo de saída contendo os valores calculados de concentração apresentados no intervalo de tempo especificado, o modelo pode ainda ter como arquivos de saída tabelas contendo valores máximos de concentração para fins regulatório, além de médias por estação, dias e até mesmo horas.

5.6. O MODELO CALPUFF

A EPA possui diretrizes para a utilização de modelos de qualidade do ar. Dessa forma, o *Californian Puff Model* (CALPUFF) foi adotado como o mais indicado para avaliação de transporte de poluentes de longo alcance e seus impactos. Entretanto, a Agência considera exceções para casos no qual haja ocorrência de grande complexidade do terreno e de regime de ventos (EPA, 2005).

O mesmo consiste em um modelo meteorológico e de qualidade do ar não estacionário avançado com base em um modelo de dispersão gaussiano tipo *puff*.

Em 1999, devido a necessidade de um complexo tratamento de fontes de emissão um projeto específico foi desenvolvido com financiamento da Administração Nacional de Aeronáutica e do Espaço (NASA). O modelo foi desenvolvido por um grupo de cientistas americanos chamado Grupo de Estudos Atmosféricos (ASG) da "Sigma Research Corporation" (SRC) e é distribuído gratuitamente. Entretanto, de acordo com Oshan et al. (2006) a utilização da versão gratuita do modelo fica atrelada a um dispêndio substancial de tempo de trabalho.

A versão indicada pela Agência Americana de Proteção ao Meio Ambiente é a Versão 5.0 desenvolvida em 2003. O modelo já se encontra na Versão 6.0, utilizada neste trabalho, que permite uma variação temporal menor que uma hora. Quando o intervalo de tempo utilizado pelo modelo é de hora em hora, as duas versões são equivalentes. Como a medição de parâmetros meteorológicos e de poluentes no Espírito Santo é realizada de hora em hora, este intervalo de tempo foi utilizado na Versão 6.0 de forma a evitar necessárias interpolações de dados para intervalos de tempo menores.

O modelo possui três etapas principais, sendo a primeira delas o modelo meteorológico diagnóstico tridimensional CALMET. Em seguida é utiliza-se do modelo de transporte e dispersão CALPUFF, e por fim o pós-processador CALPOST. Entretanto, para a utilização do modelo meteorológico CALMET é preciso fazer o uso de uma série de pré-processadores para a preparação dos arquivos de entrada no modelo meteorológico. Oshan et al. (2006) lista aplicações nas quais o uso do CALPUFF é apropriado. Estas são:

- Impactos próximos ao solo em fluxos complexos ou situações de dispersão de terreno complexo, condições de inversão, recirculação, estagnação e fumigação, transporte sobre água e condições costeiras e condições de ventos calmos com baixa velocidade;
- Transporte de longo alcance;
- Avaliação de velocidade e impactos de Classe I;
- Modelagem de poluentes críticos para elaboração de Planos Estaduais de Implementação (SIP);
- Formação de poluente secundário e modelagem de material particulado e;
- Áreas flutuantes e fontes de linha (tais como queimadas de florestas e instalações de redutores de alumínio.

5.6.1. PRÉ-PROCESSADORES

Os programas utilizados para o pré-processamento dos dados de entrada no CALMET tratam os dados de elevação do terreno, uso e ocupação do solo, linha de costa, parâmetros meteorológicos de estações de medição próximas ao solo e de sondagem de ar superior.

Os dados de terreno são processados inicialmente pelo programa TERREL. A entrada de dados consiste em dados de satélite da região em um dos formatos de entrada permitidos pelo programa. Neste estudo fez-se o uso de dados de terreno no formato permitido "Shuttle RADAR Topo Mission" com resolução de 3 segundos e 90 metros. Os arquivos utilizados para a foram obtidos através do site da organização científica de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos (*U.S. Geological Survey*), que possui dados de terreno para todo o globo.

A caracterização do uso e ocupação do solo foi realizada inicialmente a partir de interpretação de dados de fotos aéreas, e posteriormente foram utilizadas também mapas de ocupação do solo e levantamentos topográficos. O CALPUFF possui 37 categorias de cobertura para o processamento de dados geofísicos. O pré-processador responsável por tratamento destes dados é o CTGPROC. A obtenção dos dados locais foi realizada através *Global Land Cover Characterization* desenvolvidos pelo *U.S. Geological Survey*,

a Universidade de Nebrasca e a *European Comission's Joint Research Centre* (JRC). Os dados são fornecidos com espaçamento de 1 km.

Dados de linha de costa também foram utilizados, ambos os programas processam estes dados a partir de dados do *Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline* (GSHHS).O arquivo de entrada utilizado é o GSHHS_F.B. O processamento dos dados de linha de costas foi feito inicialmente no TERREL, e o arquivo de saída COAST.BLN foi reprocessado no CTGPROC.

Um terceiro programa, chamado MAKEGEO, é utilizado para processar os como entrada os dados de saída de elevação do terreno (TERREL.DAT), de ocupação do solo (LU.DAT) e de linha de costa (COAST.BLN) e gerar apenas um arquivo chamado GEO.DAT, que será utilizado no CALMET.

Os dados de superfície são processados pelo programa PMERGE, que permite a entrada de dados por uma série de tipos de arquivo. O utilizado neste estudo foi o não formatado, caracterizado por uma Arquivo de dados de texto com separação por virgula (.CSV). Foram utilizados dados de superfície da estação meteorológica controlada pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) localizada no Aeroporto Eurico de Aguiar Salles, em Vitória. A estação metereológica de Carapina integrante da Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar na Grande Vitória (RAMQAr) foi utilizada apenas para complementação dos parâmetros não monitorados na estação do Aeroporto, que no caso foram precipitação e humidade relativa. O programa processa os dados de vento, temperatura, pressão, umidade, cobertura de nuvens e código de precipitação de todas as estações utilizadas e gera um arquivo de saída chamado surf.dat.

O programa SMERGE processa apenas os códigos de precipitação, ou seja, 1 no caso de precipitação acumulado maior que zero, e 0 caso não haja ocorrência de chuva no intervalo. Dessa forma, o programa opcional para entrada de dados de precipitação PMERGE é utilizado os dados de precipitação acumulada por intervalo de tempo das estações meteorológicas de superfície para processamento dos dados de chuva, e gera o arquivo precip.dat para entrada no CALMET.

Por último, o programa READ62 processa os dados de sondagem de ar superior. Na Região Metropolitana da Grande Vitória apenas a estação do Aeroporto possui dados de ar superior. O programa gera um arquivo de saída UP.DAT que será utilizado no CALMET. Além dos pré-processadores abordados, existem outros opcionais que podem ser utilizados.

5.6.2. CALMET

De uma maneira generalizada, o CALMET consiste em um modelo meteorológico que desenvolve campos de ventos e temperatura em um domínio de malha tridimensional, e ainda inclui dados meteorológicos associados a campos de duas dimensões tais como altura de mistura, características de superfície e propriedades de dispersão.

O diagnóstico dos campos de ventos é realizado em duas etapas. A primeira é uma estimativa inicial ajustada para os efeitos cinemáticos do terreno, fluxos de encosta e efeitos de bloqueio, já o segundo consiste um uma análise objetiva para introduzir dados observados de vento e produzir o campo de ventos final (ASG, 2011).

O arquivo de controle para entrada de dados (CALMET.INP) é aonde se estrutura os nomes e diretórios dos arquivos de entrada e saída do modelo, o período de simulação, os parâmetros para cálculo meteorológico, entre outros.

O período utilizado neste estudo foi de 01/01/2010 às 0h:00min até 28/12/2010 às 23h:00min. Os últimos dias de 2010 não foram processados devido a falta de dados meteorológicos e de ar superior nesta data, impedindo o funcionamento do programa.

Os parâmetros relativos à camada de mistura possuem valores padrões, entretanto o parâmetro de Coriolis foi modificado conforme Silva e Sarnaglia (2010) no qual o coeficiente foi alterado para 0,00005 para a zona intertropical nas proximidades da latitude de 20°, de forma que o padrão é utilizado para latitudes médias. Este valor foi obtido a partir da equação elaborada por Holton (2004):

$$f = 2\omega \, sen(\varphi) \qquad (2)$$

f é o parâmetro de Coriolis;

ω é a velocidade angular da Terra;

φ é a latitude.

A distância de influência do terreno foi estabelecida como 10 km, pois de acordo com as perguntas frequentes do sítio da SRC este parâmetro deve ser estabelecido em ordem de 5 a 10 vezes o espaçamento da malha. As distâncias máximas de influência das estações foram definidas como 10 km sobre a terra e 15 km sobre a água. Nos casos na qual a observação e a primeira estimativa do campo de vento possuem o mesmo valor relativo a distância estabelecida foi de 1 km (Silva & Sarnaglia, 2004).

Para execução do programa é necessário o arquivo controle de entrada de dados (CALPUFF.INP), o arquivo contendo declaração dos parâmetros (PARAMSL.MET) e o arquivo executável (CALMET.EXE). Para a simulação os dados mandatórios de entrada são os dados do terreno (GEO.DAT), os dados de superfície (SURF.DAT) e os dados de ar superior (UP.DAT). Neste trabalho fez-se o uso de entrada de dados de precipitação também (PRECIP.DAT) devido a grande influência da mesma na deposição úmida para partículas.

Após execução do programa obtêm-se dois arquivos. O primeiro consiste em um arquivo de controle da simulação (CALMET.LST), no qual é possível identificar todos os erros e alertas caso o programa não tenha funcionado de maneira apropriada. O outro arquivo é o arquivo de dados (CALMET.DAT) utilizado para entrada no CALPUFF. Segue abaixo na Tabela 11 uma descriminação dos arquivos de entrada e saída do programa.

Tabela 11: Descrição dos arquivos de entrada e saída do CALMET

Arquivos de entrada		**Arquivos de saída**	
CALMET.INP	Entrada de parâmetros	CALMET.LST	Controle da simulação
GEO.DAT	Dados geofísicos	CALMET.DAT	Dados entrada CALPUFF
SURF.DAT	Dados de superfície		
UP.DAT	Dados de ar superior		
PRECIP.DAT	Dados de precipitação		

5.6.3. CALPUFF

O CALPUFF realiza a simulação da dispersão de poluentes de forma contínua ou intermitente por fontes pontuais, de área, de linha e volumétricas, com ou sem variações de emissão a partir de um modelo gaussiano de puff.

O modelo de *puff* gaussiano representa a pluma a partir de um número grande de pacotes discretos de material poluente. Cada *puff* possui uma determinada massa que é distribuída inicialmente de maneira uniforme ou gaussiana, sendo a última a mais utilizada. O transporte do *puff* ocorre de acordo com a trajetória de seu centro de massa, que é determinada pelo vetor velocidade do vento local. Ao longo da trajetória, o *puff* sofre expansões gaussianas segundo os coeficientes de dispersão σ_x , σ_y e σ_z e da evolução do tempo. A Figura 33 relata a expansão de um *puff* gaussiano.

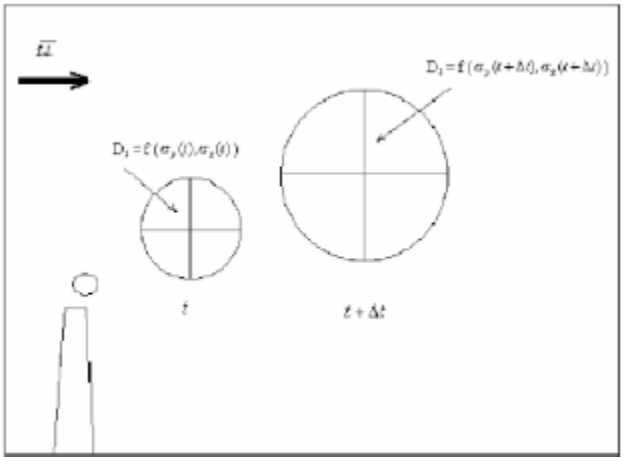

Figura 33 – Um *puff* em dois instantes de tempo. Fonte: Moraes, 2004.

Conforme a dispersão de poluentes ocorre de forma não estacionária e não homogênea, o modelo possui a capacidade de lidar com campos complexos de vento e grandes

variações de uso e ocupação do solo (VICENTINI, 2011).O modelo é apropriado também apara simular situações de calmaria para ventos ventos que menores que 1 m/s.

O CALPUFF utiliza dados de fontes emissoras, receptores, caracterização geofísica e meteorológica, intervalo de processamento, e parâmetros de controle para a simulação da dispersão.

Os dados de fontes emissoras são divididos em quatro grupos: fontes pontuais, fontes de área, fontes de linha e fontes volumétricas. Cada um destes tipos de fontes é separado em um subgrupo diferente (14 ao 17), e pede informações diferentes de entrada relevantes ã sua caracterização. O detalhamento destes dados de fontes será realizado em um próximo item descritivo das fontes de entrada.

Os dados receptores de medição podem ser utilizados de duas maneiras. A primeira é com a especificação de uma malha receptora, e no caso deste estudo utilizou-se a mesma malha computacional da simulação. Uma segunda opção é a de receptores discretos, com específica localização geográfica. Para este trabalho foram adicionados as oito estações da Rede de automática de monitoramento da qualidade do ar da Grande Vitória (RAMQAr). Este item também será melhor abordado em um tópico posterior.

Os dados de caracterização geofísica e meteorológica são obtidos a partir do arquivo de saída do CALMET (CALMET.DAT), sendo este um dos arquivos de entrada no CALPUFF. O período de modelagem especificado no arquivo de parâmetros de entrada (CALPUFF.INP) foi o mesmo que o utilizado no CALMET, com o intervalo de 01/01/2010 às 0h:00min até 28/12/2010 às 23h:00min. Os arquivos de saída são os dados de controle e verificação da simulação (CALPUFF.LST) e os dados das concentrações simuladas no domínio especificado (CALPUFF.DAT). Segue relato dos arquivos na tabela abaixo.

Tabela 12: Descrição dos arquivos de entrada e saída do CALMET.

Arquivos de entrada		**Arquivos de saída**	
CALPUFF.INP	Entrada de parâmetros	CALPUFF.LST	Controle da simulação
CALMET.DAT	Dados meteorológicos	CALPUFF.DAT	Dados de concentração dos poluentes

5.6.4. CALSUM

O CALSUM é um pós-processador opcional utilizado para realizar a junção de dados simulados para um mesmo domínio computacional e intervalo de tempo. A divisão de simulações é utilizada para ganho de eficiência e rapidez computacional. O programa possui capacidade também para realização de operações de soma e multiplicação com os valores de concentração de poluentes.

Neste estudo foi feito o uso de três computadores, de forma que foi realizada uma divisão por tipos de fontes. O primeiro arquivo (CALPUFF_A.DAT) contém dados de simulação da maior parte das fontes pontuais, de forma que o máximo de fontes pontuais permitidas pelo arquivo de controle de parâmetros do CALPUFF (PARAMSL.PUFF) é equivalente a duzentos, O segundo arquivo (CALPUFF_B.DAT) é referente a simulação da segunda parte das fontes pontuais e as fontes móveis, tratadas como fontes de área. O terceiro e último arquivo (CALPUFF_C.DAT) possui os dados de concentração de material particulado das fontes volumétricas e as de área que não são fontes móveis.

A entrada do programa consiste em um arquivo de controle (CALSUM.INP) com especificação dos arquivos de concentração de poluentes de entrada e informações de controle. O programa gera um arquivo de saída de controle da operação (CALSUM.LST) e um arquivo de concentração total dos dados (CALSUM.DAT). A tabela abaixo relata de maneira simples estes arquivos.

Tabela 13: Descrição dos arquivos de entrada e saída do CALMET.

Arquivos de entrada		**Arquivos de saída**	
CALSUM.INP	Entrada de parâmetros	CALSUM.LST	Controle da simulação
CALPUFF_A.DAT	Fontes pontuais	CALSUM.DAT	Concentração total de poluentes
CALPUFF_B.DAT	Fontes bidimensionais		
CALPUFF_C.DAT	Fontes tridimensionais		

5.6.5. CALPOST

O pós-processador CALPOST fornece os dados de concentração, fluxo de deposição seca e úmida baseado nos arquivos de saída do CALPUFF, ou neste caso, o arquivo de saída

do CALSUM. Ele também pode fornecer dados de visibilidade e outras informações caso o CALPUFF tenha sido programado para fornecer tais parâmetros. Para este estudo o CALPOST foi utilizado para processar as informações de concentração de PM_{10} para o domínio computacional e intervalo de tempo pré-estabelecidos, de forma a possibiliatrem o emprego deste arquivo para geração de mapas ou gráficos de concentração.

Pode-se determinar também o intervalo de tempo para impressão da concentração de poluente e para quais receptores. No presente traba;ho fez o uso de medições de 1 em 1 hora, 24 horas e um ano. Os dados de receptores utilizados foram aqueles dos receptores discretos referentes a estações de monitoramento de qualidade do ar do RAMQAr.

5.7. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS

Os parâmetro estatísticos a serem utilizados na comparação dos modelos serão alguns dos usados por Silva e Sarnaglia (2010) em seu trabalho de avaliação de desempenho do modelo CALPUFF. Os índices estatísticos utilizados foram o coeficiente de correlação (COR), o vício, o erro quadrático médio normalizado ($NMSE$), desvio fracional (FB), e a razão entre *Robust High Concentration* (RHC).

Todas os índices usam a média como base, a qual é dada por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_1^N x_i}{N} \tag{3}$$

O coeficiente de correlação indica a relação linear entre duas séries de dados, neste caso, as concentrações calculadas pelo modelo e as concentrações medidas na estação Carapina, através da seguinte equação:

$$COR = \frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})\,(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_1^N (y_i - \bar{y})^2}} \tag{4}$$

Onde x representa as concentrações calculadas e y as concentrações medidas.

O vício é apenas o erro médio entre os dados estimados e os dados medidos, sendo obtido por:

$$vício = \frac{\sum_1^N (x_i - y_i)}{N} \tag{5}$$

Onde x representa as concentrações calculadas e y as concentrações medidas.

O erro quadrático médio normalizado indica os desvios gerais entre valores estimados e medidos e que mostra geralmente as diferenças mais acentuadas entre as séries de dados, sendo dado por:

$$NMSE = \frac{1}{N}\sum_1^N \frac{(x_i - y_i)^2}{\bar{x}\bar{y}} \tag{6}$$

Onde x representa as concentrações calculadas e y as concentrações medidas.

O desvio fracional é recomendado pela EPA como medida de performance (Radonjic *et al.*, 2004) e variam de -2, onde há subestimação extrema, a +2, onde há superestimação extrema. O valor zero é o ideal, equivalente a estimativas quase livres de desvio. Ele é obtido como:

$$FB = 2\frac{(\bar{x} - \bar{y})}{(\bar{x} + \bar{y})} \tag{7}$$

Onde x representa as concentrações calculadas e y as concentrações medidas.

O *Robust High Concentration* representa a estimativa das mais altas concentrações baseadas numa curva exponencial para a distribuição de concentrações (Silva e Sarnaglia, 2010), sendo obtido por:

$$RHC = x_n + (\bar{x} - x_n)\ln\left(\frac{3n - 1}{2}\right) \tag{8}$$

Onde n é o número de valores usados para caracterizar as maiores concentrações ($n = 26$, como sugerido por Silva e Sarnaglia *apud* Cox *et al.*, 2010). A razão entre os valores de *Robust High Concentration* foi então calculada e usada para comparar os modelos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo irá apresentar os resultados obtidos a partir das modelagens desenvolvidas, assim como fornecerá comparação entre os dados obtidos de ambos os modelos implementados, AERMOD e CALPUFF.

A analise comparativa será realizada a partir de gráficos da concentrações horárias e diárias de PM_{10} das oito estações estabelecidas do RAMQAr dos valores medidos nas estações em 2010, e da modelagem dos receptores discretos para o AERMOD e CALPUFF.

Será feito o uso dos índices estatísticos apresentados na seção anterior para análise comparativa entre os dados medidos pelas estações e os obtidos na modelagem. Estes índices serão comparads com trabalhos de outros autores que também utilizaram os modelos abordados neste presente estudo. Entretanto, uma comparação mais acentuada será realizada com o estudo de Silva & Sarnaglia (2010) que consiste no estudo da qualidade do ar na Região Metropolitana da Grande Vitória empregando o modelo de dispersão atmosférica CALPUFF.

Por fim, uma última análise será realizada a partir de gráficos tipo QuantumxQuantum entre os dados previstos pelos modelos e os dados medidos pela estação, ou seja, AERMOD versus RAMQAr e CALPUFF versus RAMQAr, e também entre os próprios modelos em si (AERMOD versus CALPUFF).

As Figuras 34 a 41 apresentam as médias diárias de concentração de PM10 obtidas experimentalmente e pelos modelos AERMOD e CALPUFF, para cada uma das estações de monitoramento. Através da visualização das séries de dados pode-se inferir uma tendência dos modelos, de modo geral. O modelo AERMOD subestima as concentraçoes para a maior parte das estações, e mais significantemente para a estação de Cariacica. No caso do modelo CALPUFF náo é possível realizar a aferição da tendência global do modelo somente através dos gráficos, dessa forma, este dado será analisado através dos parâmetros estatísticos. Pode-se observar também através dos gráficos que ambos modelos encontraram valores de concentração de PM10 que superestimam e subestimam

a concentração medida, de forma que os maiores valores de concentração deste poluente foram encontrados pelo CALPUFF, com exceção da estação de Cariacica. Conforme o *Vancouver Island Energy Corporation* (2002), as concentrações máximas previstas pelo CALPUFF são maiores que as observadas através de medição.

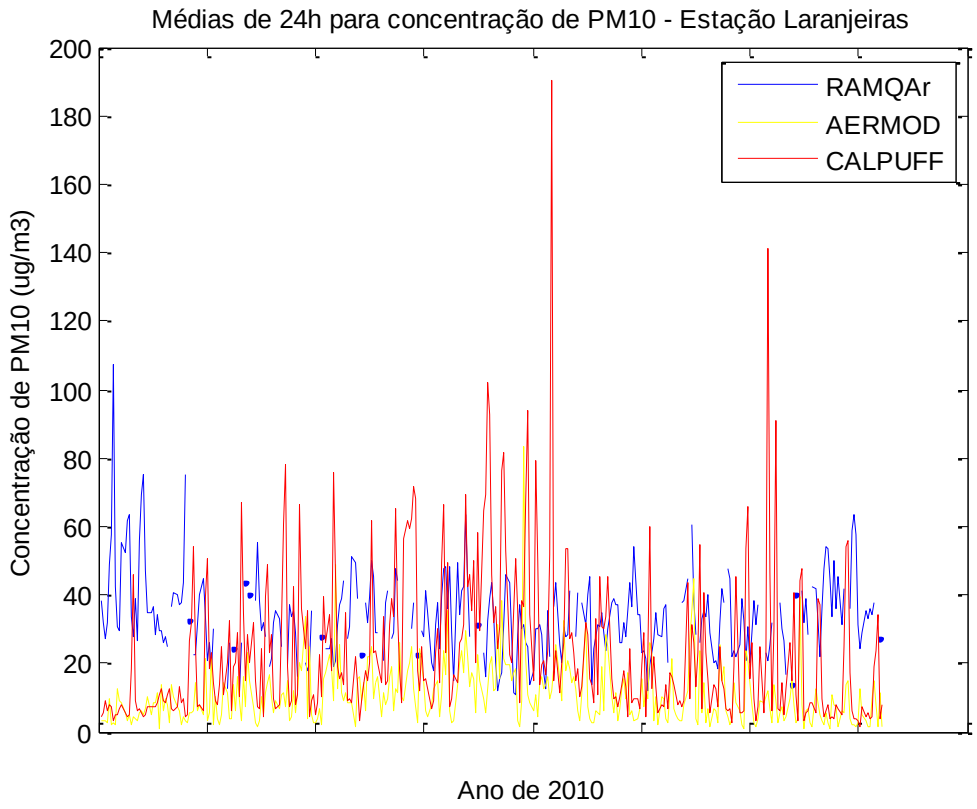

Figura 34 – Gráficos da média diária de concentração de PM_{10} (µg/m³) para a Estação de Laranjeiras.

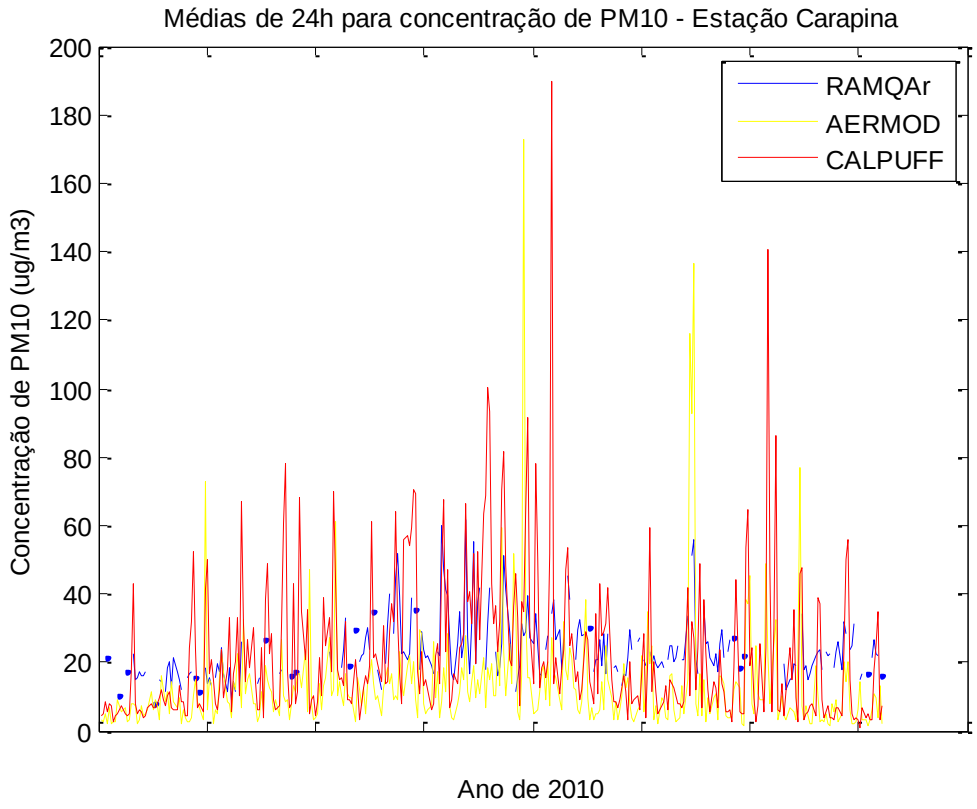

Figura 35 – Gráficos da média diária de concentração de PM_{10} (µg/m³) para a Estação de Carapina.

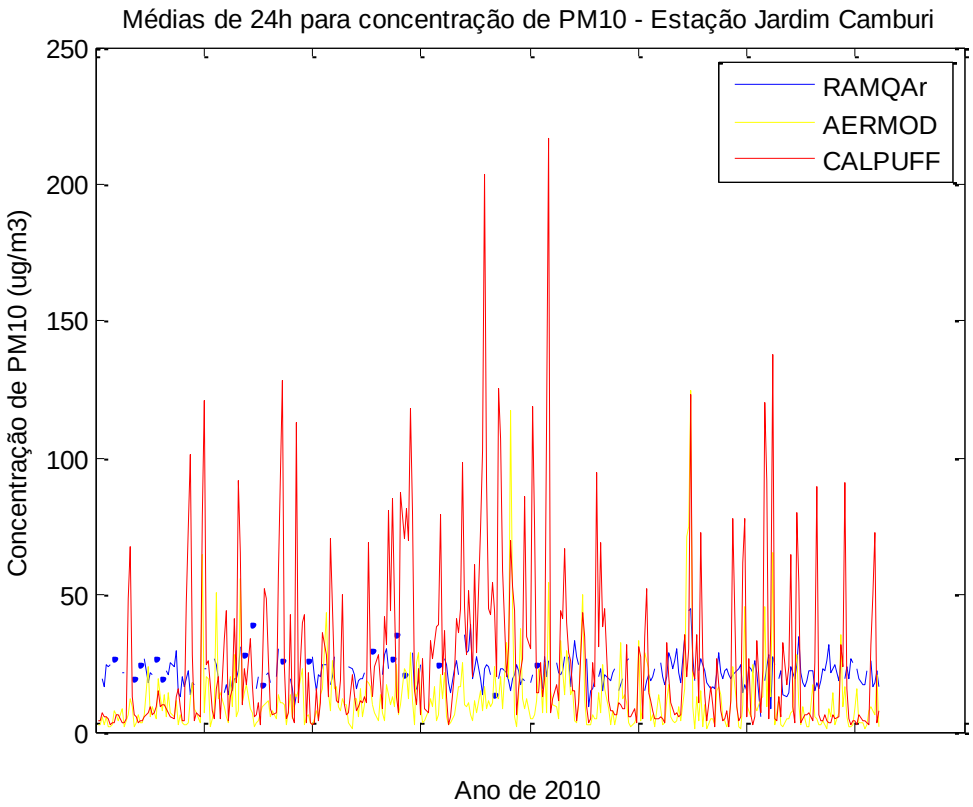

Figura 36 – Gráficos da média diária de concentração de PM_{10} (µg/m³) para a Estação Jardim Camburi.

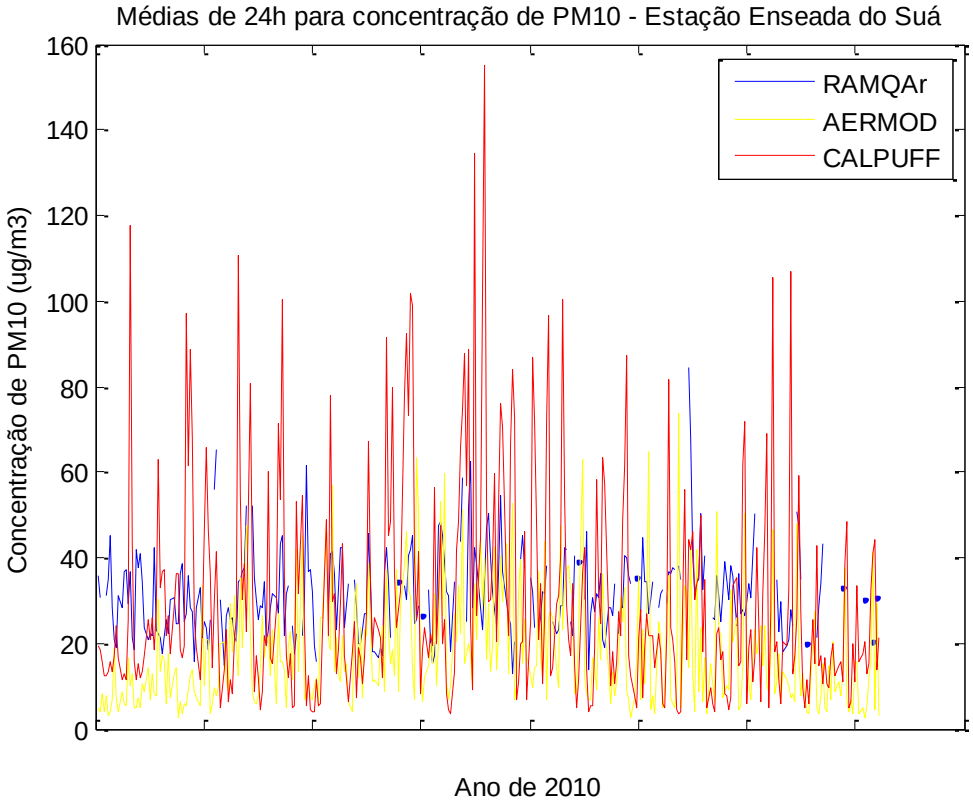

Figura 37 – Gráficos da média diária de concentração de PM_{10} (µg/m³) para a Estação Enseada do Suá.

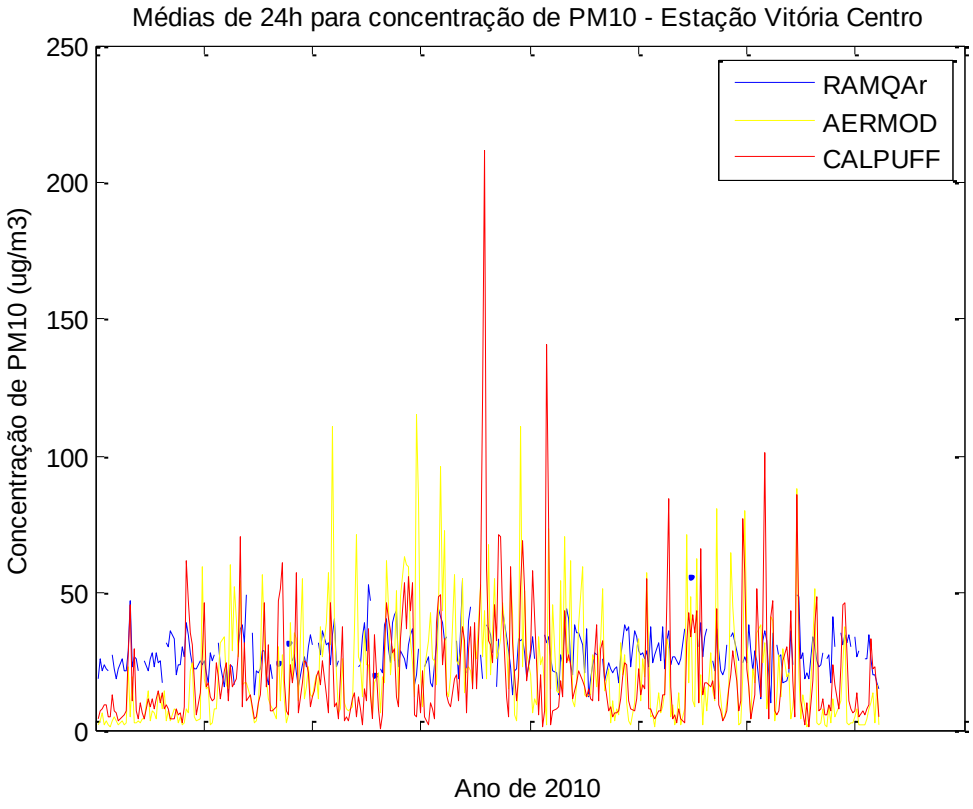

Figura 38 – Gráficos da média diária de concentração de PM_{10} (µg/m³) para a Estação Vitória Centro.

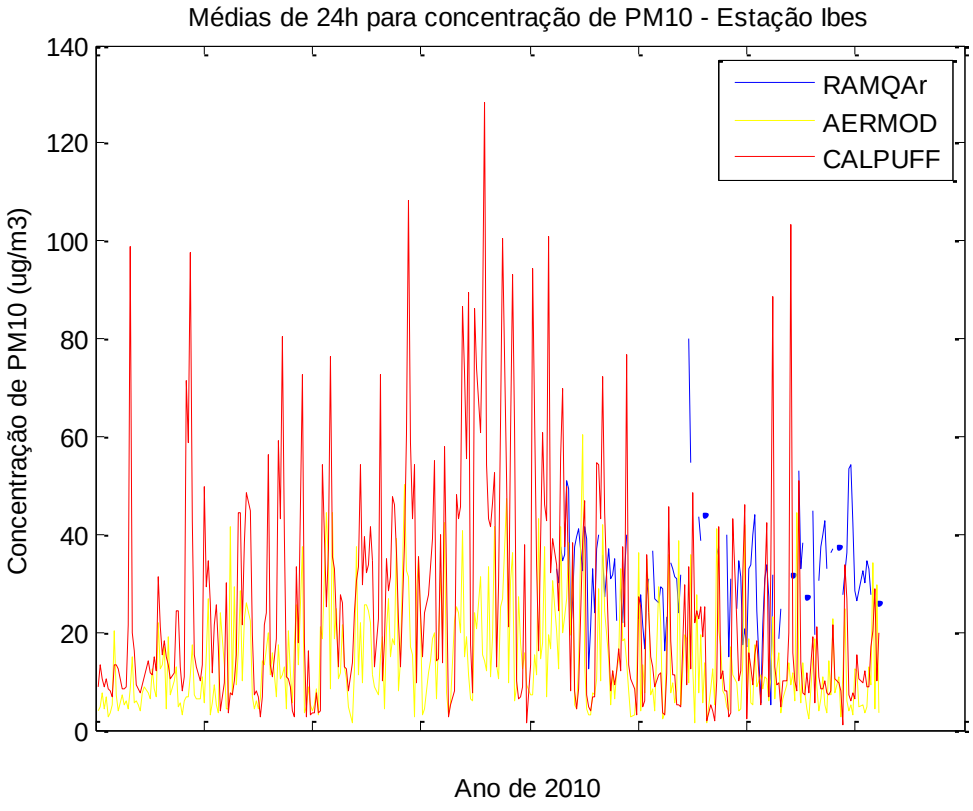

Figura 39 – Gráficos da média diária de concentração de PM_{10} (µg/m³) para a Estação Ibes.

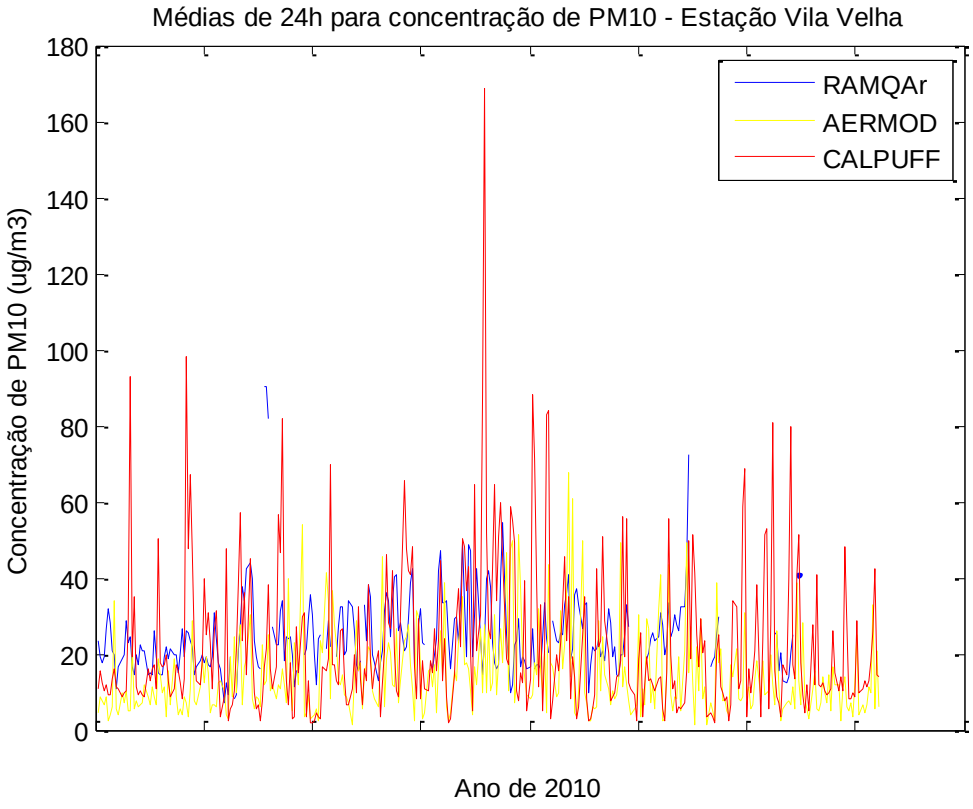

Figura 40 – Gráficos da média diária de concentração de PM_{10} (µg/m³) para a Estação Vila Velha.

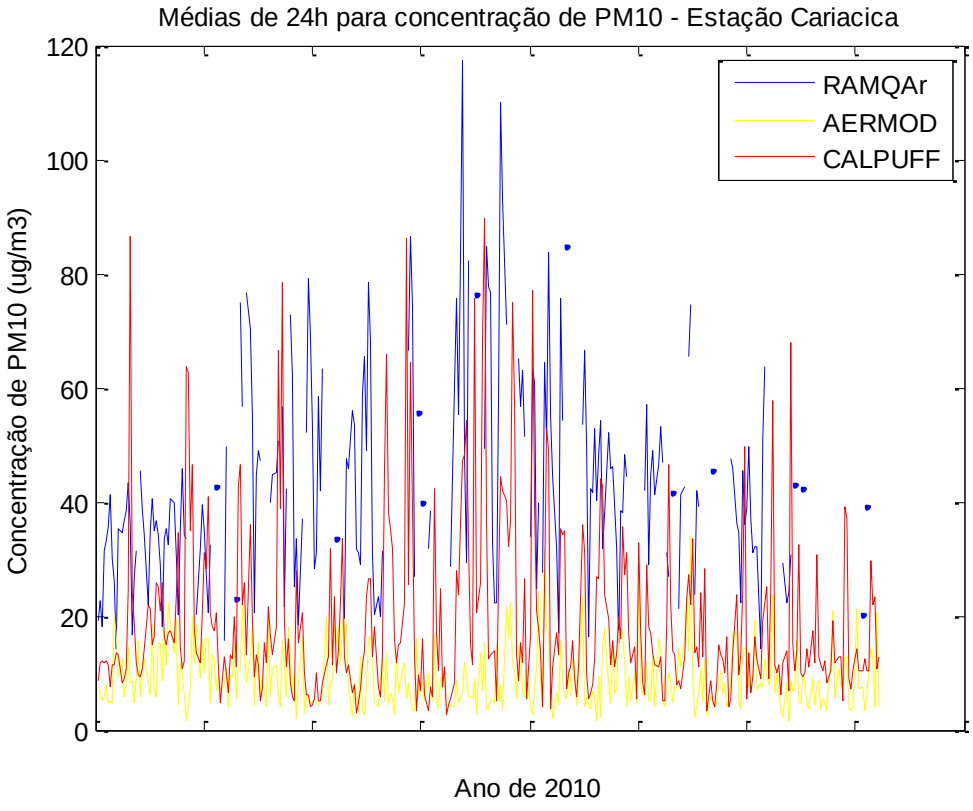

Figura 41 – Gráficos da média diária de concentração de PM_{10} (µg/m³) para a Estação Cariacica.

Tabela 14 – Indicadores estatísticos das médias horárias das estações de monitoramento da RMGV .

Parâmetros Estatísticos	Estação Laranjeiras		Estação Carapina		Estação Jardim Camburi		Estação Enseada do Suá	
	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF
Coeficiente de Correlação	-0.037	-0.079	0.038	0.179	0.058	0.023	-0.034	0.003
Vício (µg/m³)	-24.886	-9.901	-14.715	-2.809	-13.178	5.306	-18.735	-2.205
Erro Quadrático Médio Normalizado	6.971	3.828	7.381	3.439	8.375	6.227	5.903	3.994
Desvio Fracional	-1.212	-0.351	-0.899	-0.124	-0.854	0.213	-0.832	-0.071
Razão entre *Robust High Concentration*	0.851	2.176	2.466	3.108	3.883	5.637	2.485	3.406
Parâmetros Estatísticos	**Estação Vitória Centro**		**Estação Ibes**		**Estação Vila Velha**		**Estação Cariacica**	
	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF
Coeficiente de Correlação	0.023	0.069	0.002	0.038	-0.019	0.053	-0.078	0.074
Vício (µg/m³)	-11.739	-6.965	-15.843	-8.421	-14.293	-3.161	-35.787	-24.364
Erro Quadrático Médio Normalizado	6.675	3.967	6.464	4.124	7.119	4.152	8.753	3.137
Desvio Fracional (FB)	-0.538	-0.285	-0.734	-0.327	-0.781	-0.131	-1.435	-0.783
Razão entre *Robust High Concentration*	6.248	4.838	3.946	3.700	3.674	4.107	0.887	1.641

A Tabela 14 apresenta os indicadores estatísticos para a relação entre os dados medidos de concentração horária de PM_{10} das estações componentes do grupo RAMQAr e as concentrações obtidas a partir da modelagem da dispersão atmosférica de PM_{10} pelos modelos computacionais AERMOD e CALPUFF.

Conforme os dados obtidos, pode-se concluir que os valores do coeficiente de correlação apresentam valores bem abaixo de 1. Os números encontrados para o modelo de

dispersão AERMOD apresentam dados negativos para quatro estações, indicando que uma variação inversamente proporcional dos dados nestes casos. A modelagem do CALPUFF apresentou valor negativo apenas para a estação de Laranjeiras. indicando que a para as outras sete estações o modelo prevê uma variação diretamente proporcional em comparação com os dados medidos. Os coeficientes obtidos pelo CALPUFF são superiores aos obtidos pelo AERMOD para cinco estações, sendo o maior valor encontrado de 0,179 para a estação de Carapina.

Silva & Sarnaglia (2010) encontraram coeficientes de correlação para estas mesmas estações em comparação com o modelo CALPUFF com variação entre 0.01 e 0.06.As estações apresentam valores abaixo de 0,26, conforme obtido por Yaul, *et al.*, (2005), com exceção de Carapina que obteve um índice de 0,17 mais próximo do esperado. Dessa forma, os dados obtidos neste estudo são similares aos obtidos por Silva & Sarnaglia (2010).

Dados de vício apresentam valores negativos se encontram no intervalo entre cerca de 2 μg/m³ a 24 μg/m³ e 2 μg/m³ a 24 μg/m³ com valores negativos para o CALPUFF, indicando que os modelos subestimam as concentrações de poluentes.

Os dados de vício encontrados para o CALPUFF são inferiores aos obtidos pelo AERMOD, com valores abaixo de 10 μg/m³ para sete estações, indicando um erro médio menor entre os resultados. Os menores erros encontrados são 2,20 μg/m³ e 2,81 μg/m³ para o modelo CALPUFF para as estações da Enseada do Suá e Carapina, respectivamente. O menor dado obtido pelo AERMOD foi de 11,74 μg/m³.

Os valores de vício encontrados pelo estudo de Silva & Sarnaglia (2010) encontraram valores próximos 20 μg/m³ para cinco estações, próximos a 30 μg/m³ para uma, e dois valores ótimos próximos de zero, de 0,03 μg/m³ para a estação de Vila Velha-Centro e 2,28 μg/m³ para a estação da Enseada do Suá. Neste trabalho, os dados encontrados pelo AERMOD são inferiores aos de Silva & Sarnaglia (2010) para cinco estações e superiores para as três restantes, já o modelo CALPUFF apresentou valores de vício inferiores para todas as estações, exceto para a estação de Cariacica, com valor similares para a estação da Enseada do Suá.

Os índices de erro quadrático médio normalizado (NMSE) encontrados para o modelo AERMOD apresentaram valores no intervalo de 5,9 e 8,7, o modelo CALPUFF encontrou dados entre 3,13 e 4,15, com exceção da estação de Jardim Camburi com NMSE de 6,23, relatando dessa forma a inferioridade dos dados obtidos pelo CALPUFF.

Os dados encontrados pelo CALPUFF estão próximos do encontrado por Yaul, *et al.* , (2005) de 3,2, exceção feita a estação de Jardim Camburi. Silva & Sarnaglia (2010) encontraram valores próximos a três para quatro estações, próximos a zero para três, e um valor de 8,96 para a estação de Laranjeiras, apresentando então valores melhores de NMSE para as estações de Enseada do Suá, Vilha Velha Ibes e Centro.

Para trabalhos que buscam validação com estudos regulatórios, os indicadores estatísticos de razão entre *robust high concentration* (RHC) e desvio fracional (FB) possuem maior relevância, pois os mesmos indicam desempenho do modelo para as maiores concentrações de poluente encontradas. Valores maiores que um para dados de RHC indicam sobrepredições, e menores que um indicam subpredições. De forma similar ocorre com valores positivos (sobrepredições) e valores negativos de desvio fracional.

Os valores encontrados de desvio fracional (FB) foram todos negativos, exceto o CALPUFF para a estação de Jardim Camburi, relatando que ambos o modelo subestimam os dados de concentração do poluente. Os valores obtidos pelo CALPUFF apresentaram os menores indicadores para todas as estaçoes, com valores mínimos e máximos de 0,071 e 0,783, enquanto os valores encontrados pelo AERMOD variam de 0,528 a 1,435. O menor valor encontrado foi de 0,071 para a estação de Enseada do Suá. O menor valor encontrado por este estudo é inferior ao valor mínimo de desvio fracional encontrado Silva & Sarnaglia (2010) de 0,24.

O indicador estatístico de RHC relata que ambos modelos superestimam as concentrações de poluentes, com exceção da estação de Laranjeiras e Cariacica para o modelo AERMOD. Os valores mais próximos de um foram estes dois últimos que subestimaram as concentrações de pm10, com valores de 0,851 e 0,887 respectivamente. Valores menos que 1 foram encontradas para as estações de Laranjeiras, Jardim Camburi e Ibes no estudo de Silva & Sarnaglia (2010). Embora nos gráficos de concentração existam muitos

valores baixos, os valores muito grandes podem elevar o índice de RHC, fazendo com que a razão se torne maior que um.

A Tabela 15 apresenta os indicadores estatísticos para as médias diárias de concentração de PM10 obtidas através da comparação dos modelos AERMOD e CALPUFF e os dados medidos pelas estações de monitoramento.

Tabela 15 – Indicadores estatísticos das médias diárias das estações de monitoramento da RMGV .

Parâmetros Estatísticos	Estação Laranjeiras		Estação Carapina		Estação Jardim Camburi		Estação Enseada do Suá	
	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF
Coeficiente de Correlação	-0.144	-0.210	0.151	0.244	0.049	-0.069	0.107	0.141
Vício (µg/m³)	-22.514	-11.483	-13.910	-4.536	-11.772	2.773	-13.559	-0.538
Erro Quadrático Médio Normalizado	2.139	1.076	1.693	0.934	1.480	1.909	0.760	0.707
Desvio Fracional	-1.022	-0.414	-0.756	-0.195	-0.684	0.111	-0.548	-0.017
Razão entre *Robust High Concentration*	3.084	9.831	1.102	3.584	5.153	16.400	9.603	21.318
Parâmetros Estatísticos	**Estação Vitória Centro**		**Estação Ibes**		**Estação Vila Velha**		**Estação Cariacica**	
	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF
Coeficiente de Correlação	0.232	0.316	0.116	0.246	0.136	0.141	-0.041	0.258
Vício (µg/m³)	-6.116	-6.632	-9.349	-7.753	-10.817	-2.411	-27.689	-19.328
Erro Quadrático Médio Normalizado	0.753	0.667	0.834	0.713	0.931	0.829	2.946	1.074
Desvio Fracional (FB)	-0.247	-0.268	-0.372	-0.297	-0.547	-0.100	-1.137	-0.669
Razão entre *Robust High Concentration*	81.431	269.550	102.436	-428.813	2.940	4.772	0.388	1.271

Os índices de correlação encontrados para a média de 24 horas de concentração de PM10 são superiores para o modelo CALPUFF, com valores de até 0,3 como no caso da estação de Vitória. Os valores encontrados pelo AERMOD estão abaixo do valor de 0,26 obtido por Yaul, *et. Al*, (2006) e os calculados para o CALPUFF estão próximos para quatro estações e acima deste valor para uma. Os valores encontrados por Soares (2010) e Valentini (2011) são acima dos obtidos neste trabalho, com índices de 0,58 e 0,54.

Os valores de vício encontrado para o CALPUFF são inferiores aos obtidos pelo AERMOD, com exceção da estação de Vitória Centro. Os índices negativos para a maioria dos casos indicam a subestimação da concentração de PM10. Os menores valores encontrados foram próximos a zero de 0,538 e 2,411 com o uso do modelo CALPUFF para as estações de Enseada do Suá e Vilha Velha, respectivamente. Os menores valores encontrados por Silva & Sarnaglia (2010) foram de 2,23 para a estação de Enseada do Suá e 0,17 para Vilha Velha Centro. Entretando este índice apenas o diferencia entre as médias, prevista e medida, e não é suficiente para indicar um bom desempenho do modelo de forma que se deve considerar também a distribuição dos dados (SILVA & SARNAGLIA, 2010)

O Erro Quadrático Médio Normalizado (NMSE) calculado a partir das modelagens foi inferior na maior parte das estações para o modelo CALPUFF. Os menores valores encontrados foram de 0,760 e 0,707 da estação de Enseada do Suá, 0,753 e 0,667 para a estação Vitória Centro, 0,834 e 0,713 para a estação Ibes e 0,931 e 0,829 para a estação Vila Velha para os modelos AERMOD e CALPUFF, respectivamente, indicando um bom desempenho dos modelos nesses casos. O estudo de Silva & Sarnaglai (2010) encontrou valores próximos a zero para as estações Enseada do Suá, Vila Velha e Cariacica, com valores respectivamente de 0,28, 0,12 e 0,57, inferiores quando comparados aos obtidos neste estudo. O trabalho de Soares obteve NMSE de 0,43 para o CALPUFF e 1,98 para o AERMOD, e Vicentivi (2011) encontrou um índice de NMSE de 0,36.

Os dados obtidos de desvio fracional (FB) indicam que os modelos subestimaram as concentrações de PM10, com valores inferiores encontrados pelo modelo CALPUFF. Os menores dados obtidos foram de 0,017 para a estação Enseada do Suá e 0,1 para as estações de Jardim Camburi e Vila Velha. Os valores inferiores obtidos neste presente

estudo foram inferiores aos encontrados por Silva & Sarnaglia (2010) que alcançou valor mínimo de FB de 0,34. Soares (2010) obteve valor de FB negativo de 0,07 para o CALPUFF e positivo de 0,90 para o AERMOD, Vicentini (2011) encontrou FB negativo equivalente a 0,05.

A partir da razão RHC pode-se observar que os modelos superestimaram as concentrações mais altas de concentração do poluente modelado, exceto o AERMOD para a estação de Cariacica. Alguns valores de RHC muito altos foram encontrados para a estação Vitória Centro e Ibes. Os valores obtidos neste presente estudo foram superiores na maioria dos casos à aqueles encontrados por Silva & Sarnaglia (2010) que obtiveram valores máximos de RHC de 1,74, valores similares obtidos neste são referente a Estação de Carapina e Cariacica. Os dados de RHC do CALPUFF indicam que este superestima mais signifcantemente as maiores concentrações quando comparados ao AERMOD. Conforme *Vancouver Island Energy Corporation* (2002) as concentrações máximas previstas pelo CALPUFF são superior aos observadas.

Conforme NIST/SEMATECH (2010) apud Silva e Sarnaglia (2010), os gráficos tipo QuantilxQuantil (QxQ) determina a distribuição comum entre duas séries de dados, dessa forma os mesmos apresentam uma comparação entre as concentrações medidas pelas estações e as previstas pelos modelos. Este gráfico pode ser analisado de forma que inclinação de 1:1 apresenta o melhor resultado para o modelo.

A seguir as Figuras 42 e 43 apresentam um comparativo das concentrações horárias de PM10 entre o previsto pelos modelos AERMOD e CALPUFF e o medido pelas oito estações de monitoramento integrantes do RAMQAr. De uma maneira global, pode se observar que os gráficos subestimam as concentrações do poluente, entretanto, conforme ocorre o aumento das concentrações percebe-se a tendência de melhoria dos modelos. Este fato é relevante para estudos de caráter regulatório.

Para comparação de desempenho entre os modelos, pode-se observar que o CALPUFF obteve séries de dados com inclinação mais próxima de 1:1 para os gráficos QxQ e alcançam valores mais próximos da linha referencial de inclinação 1:1 que começa no ponto (0,0), apresentada nos gráficos pela cor azul.

A estação que apresentou melhor resultado a partir dos gráficos QuantilxQuantil foi a de Enseada do Suá, para o modelo CALPUFF. Já a estação com pior desempenho, considerando a mesma análise, foi a estação do IBES.

A Figura 44 relata os gráficos QxQ de uma análise comparativa entre as séries de dados obtidas pelos modelos AERMOD e CALPUFF. A partir destes pode-se observar que o CALPUFF encontra valores maiores de concentração de PM10 do que o AERMOD, porém, conforme ocorre o aumento das concentrações observa-se a proximidade entre a previsão dos modelos. Todas as estações apresentaram perfis similares de comparação entre os modelos.

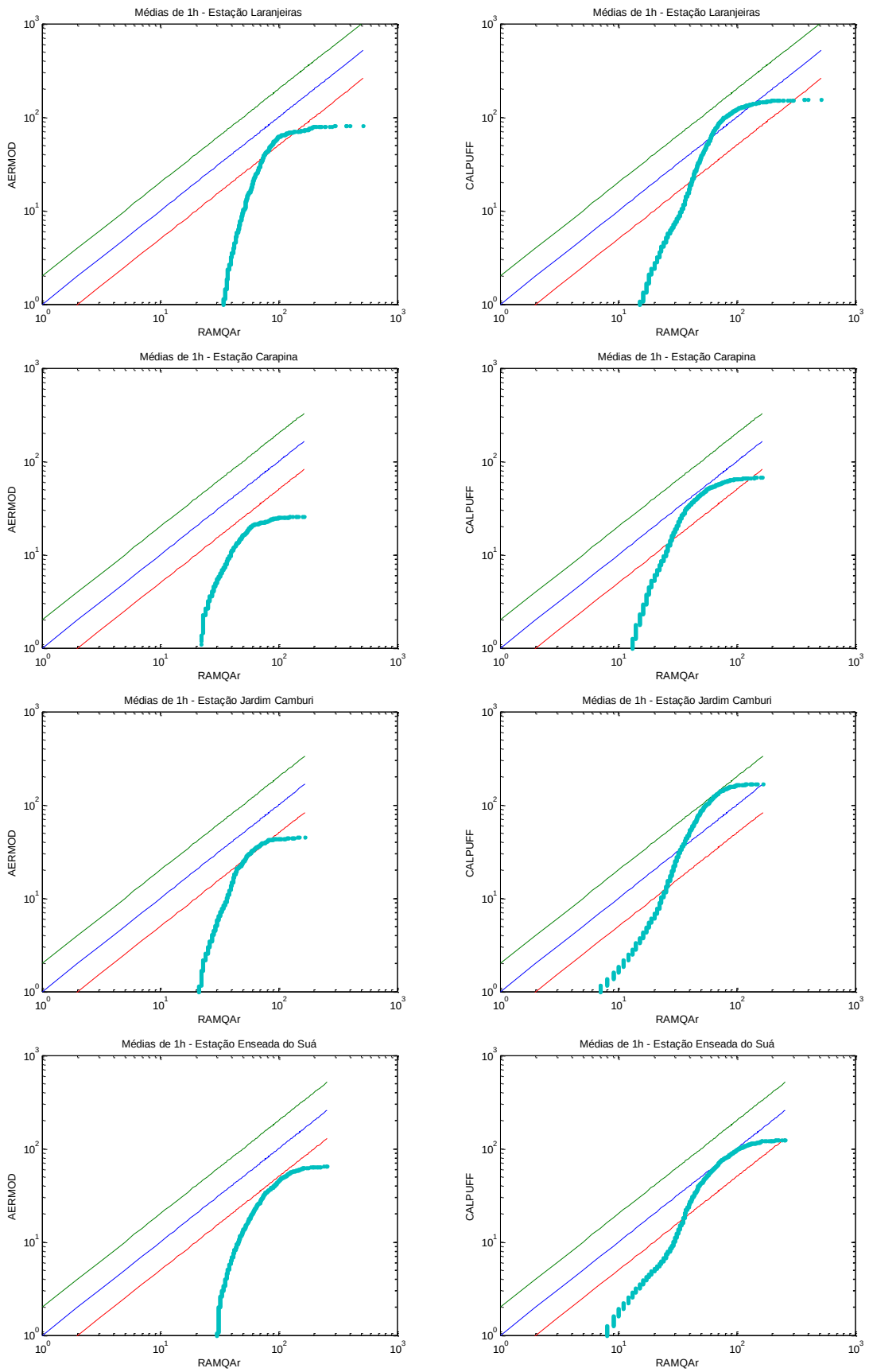

Figura 42 – Gráficos QxQ de comparação com RAMQAr em escala logarítma e concentrações em µg/m³ para a média horária das Estações de Laranjeiras, Carapina, Jardim Camburi e Enseada do Suá.

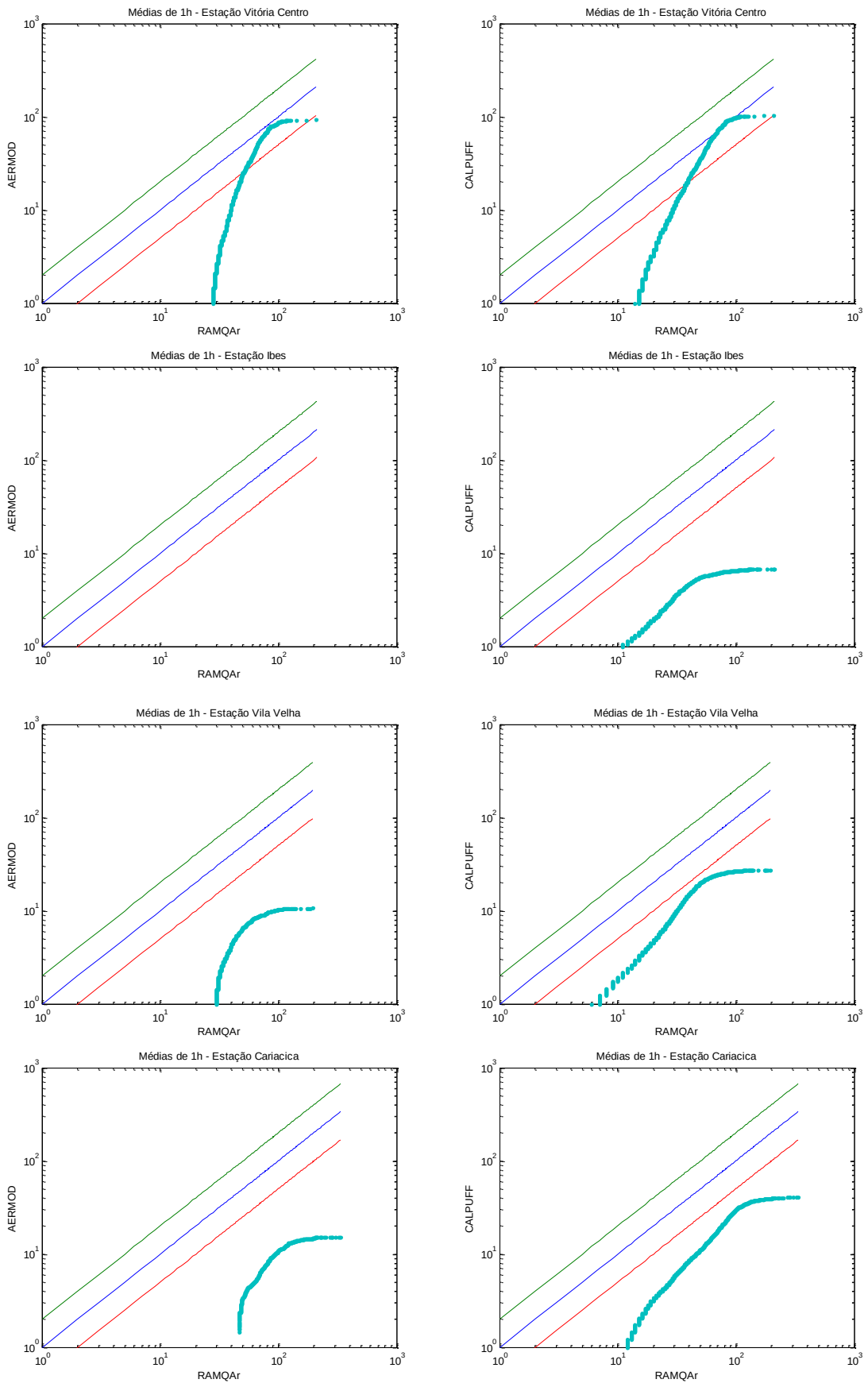

Figura 43 – Gráficos QxQ de comparação com RAMQAr em escala logarítma e concentrações em µg/m³ para a média horária das Estações de Vitóroa Centro, Ibes, Vila Velha e Cariacica.

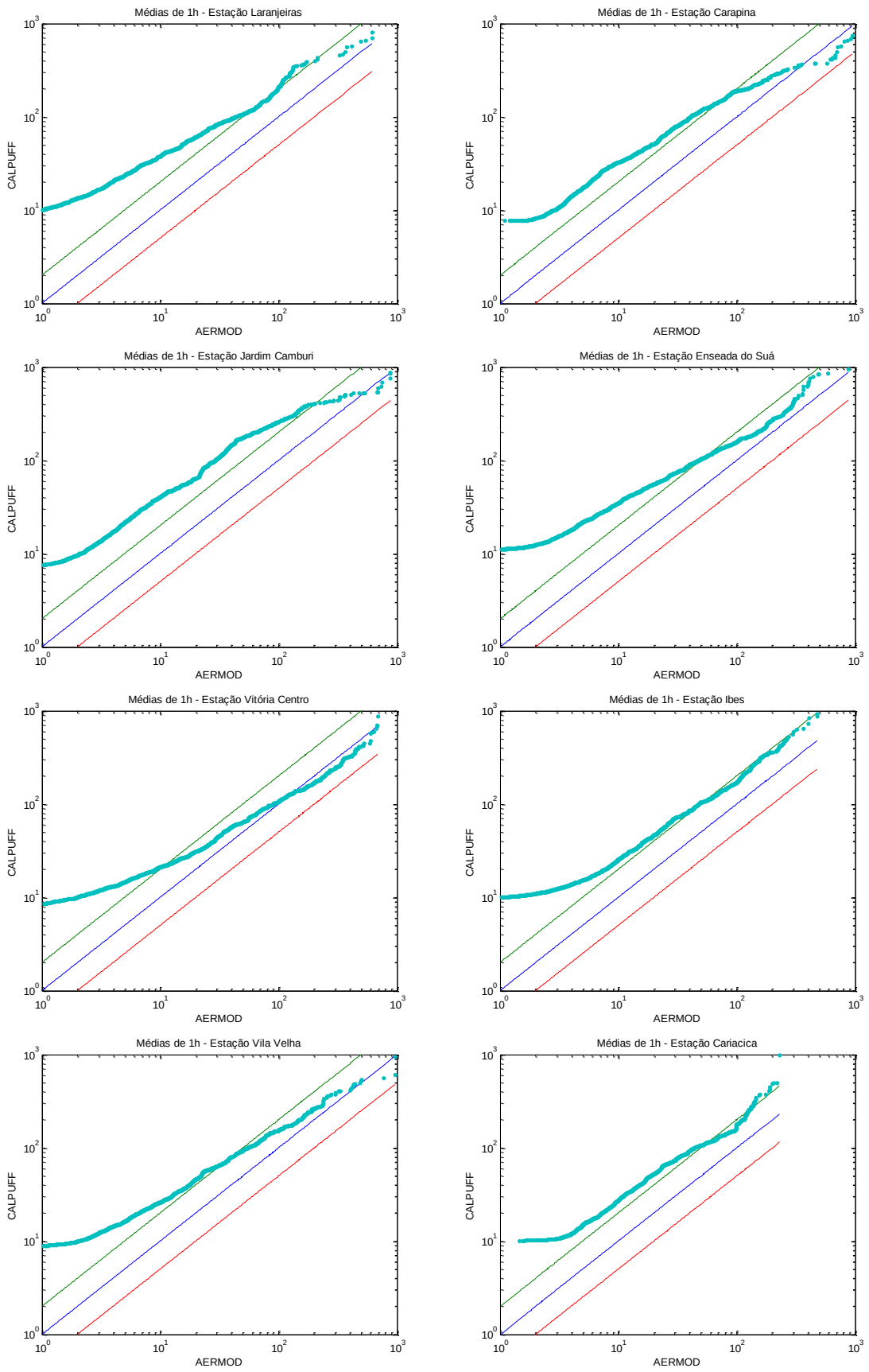

Figura 44 – Gráficos QxQ de comparação entre os modelos em escala logarítma e concentrações em µg/m³ para a média horária para todas as oito estações abordadas neste estudo.

As Figuras 45 e 46 relatam os gráficos QuantumxQuantum (QxQ) dos dados de concentração média diária de PM10 prevista pelos modelos AERMOD e CALPUFF em relação as concentrações medidas pelas estações de monitoramento. Os gráficos indicam a subestimação das concentrações pelos modelos, e assim como relatado para as médias horárias, uma melhora na performance dos modelos conforme o acréscimo das concentrações, fator positivo ao se considerar estudos de cunho regulatório.

Os dados obtidos pelo CALPUFF apresentam resultados melhores do que aqueles calculados pelo AERMOD, conforme os gráficos QxQ. Pode-se observar que as estações que apresentaram melhor resultado foram a da Enseada do Suá e Vitória Centro. A estação que apresentou resultado pior permanece sendo a estação do IBES, assim como na análise dos gráficos QxQ para média horária de concentração.

Apresenta-se na Figura 47 os gráficos QxQ para análise comparativa para os resultados alcançados entre os modelos AERMOD e CALPUFF. O modelo CALPUFF encontra valores superiores de concentração de PM10 que o modelo AERMOD. O gráfico de todas as estações apresenta um perfil similar, com inclinação próxima de 1:1.

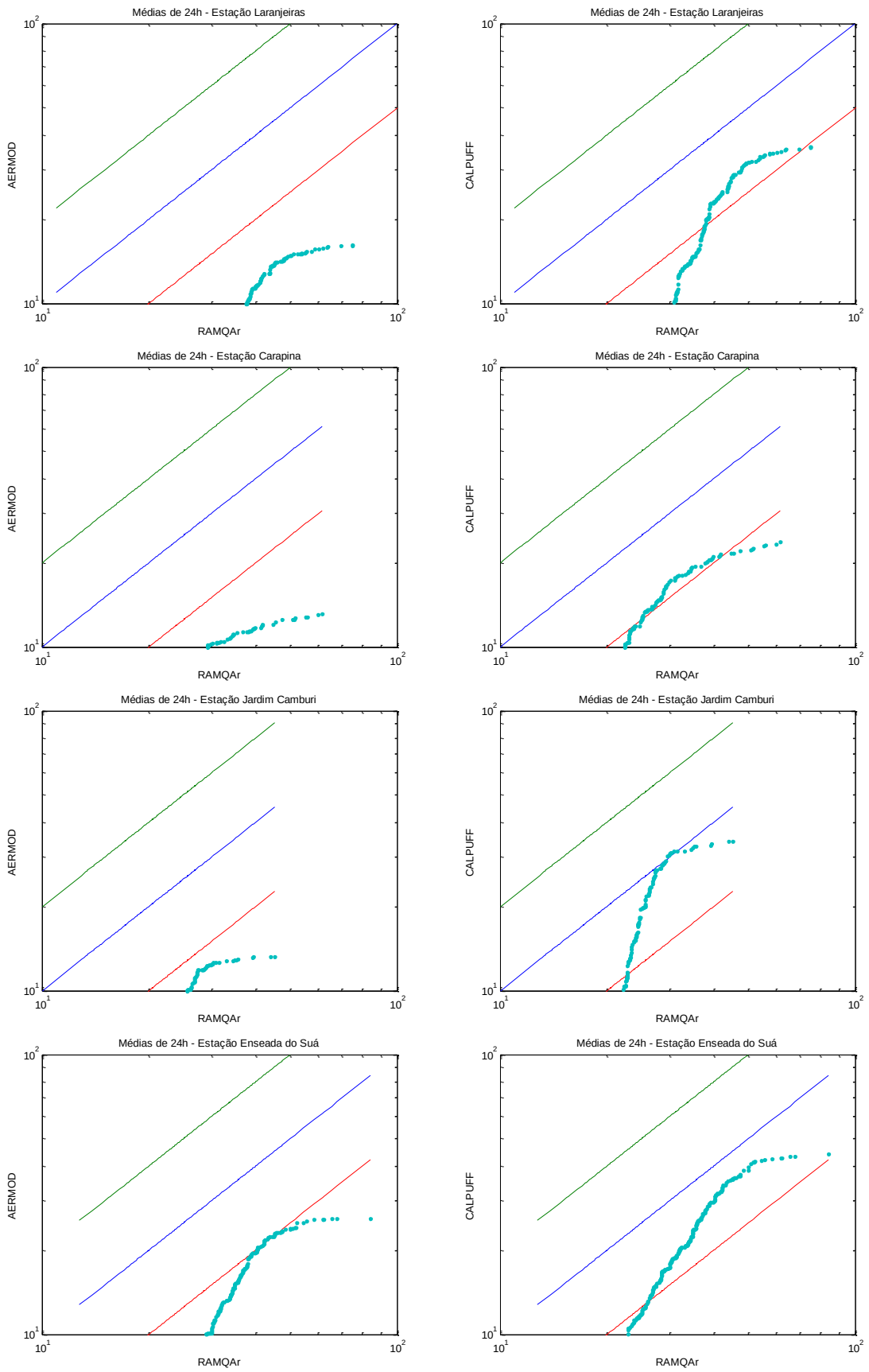

Figura 45 – Gráficos QxQ de comparação com RAMQAr em escala logarítma e concentrações em µg/m³ para a média diária das Estações de Laranjeiras, Carapina, Jardim Camburi e Enseada do Suá.

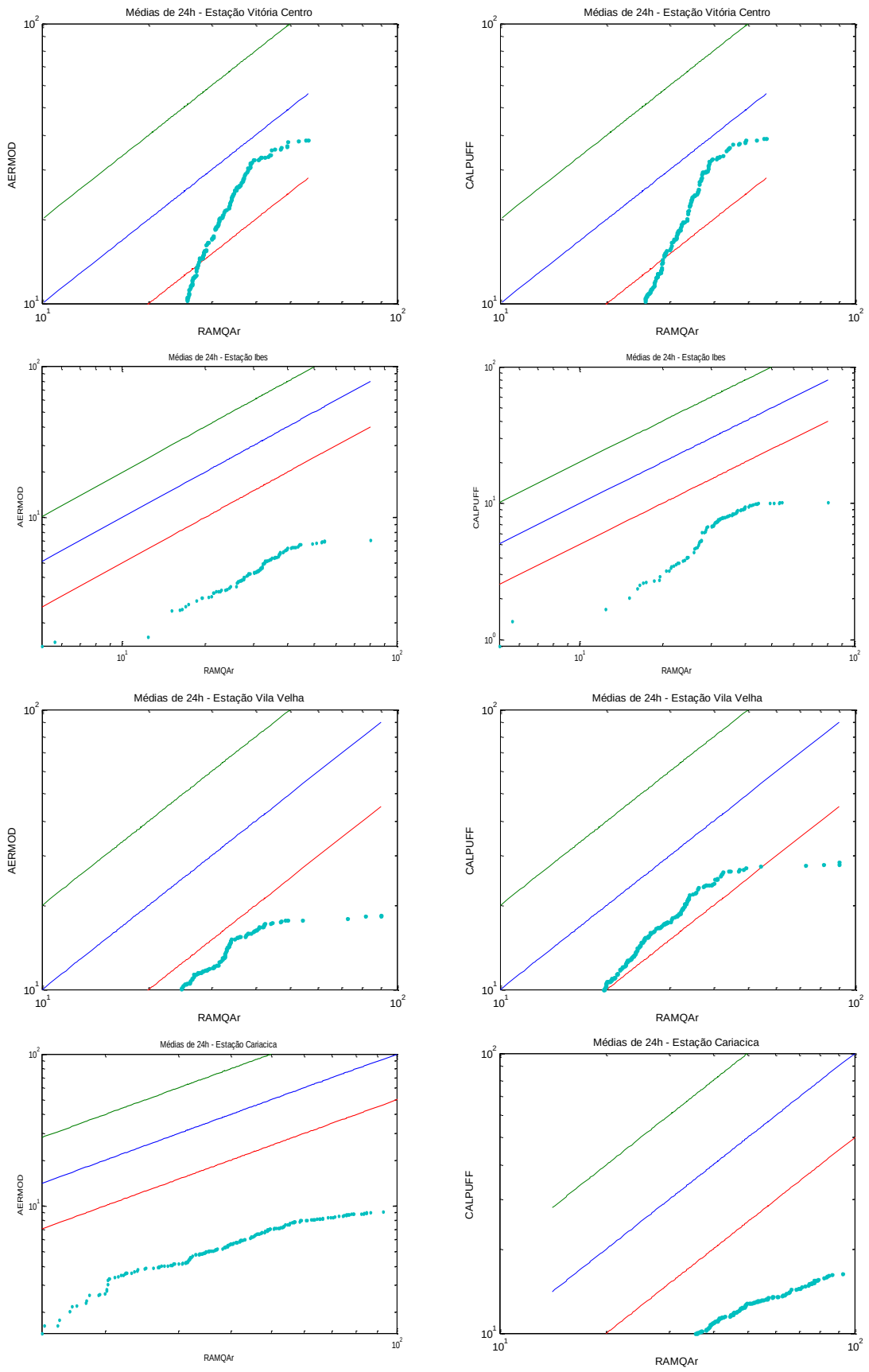

Figura 46 – Gráficos QxQ de comparação com RAMQAr em escala logarítma e concentrações em µg/m³ para a média diária das Estações de Vitóroa Centro, Ibes, Vila Velha e Cariacica.

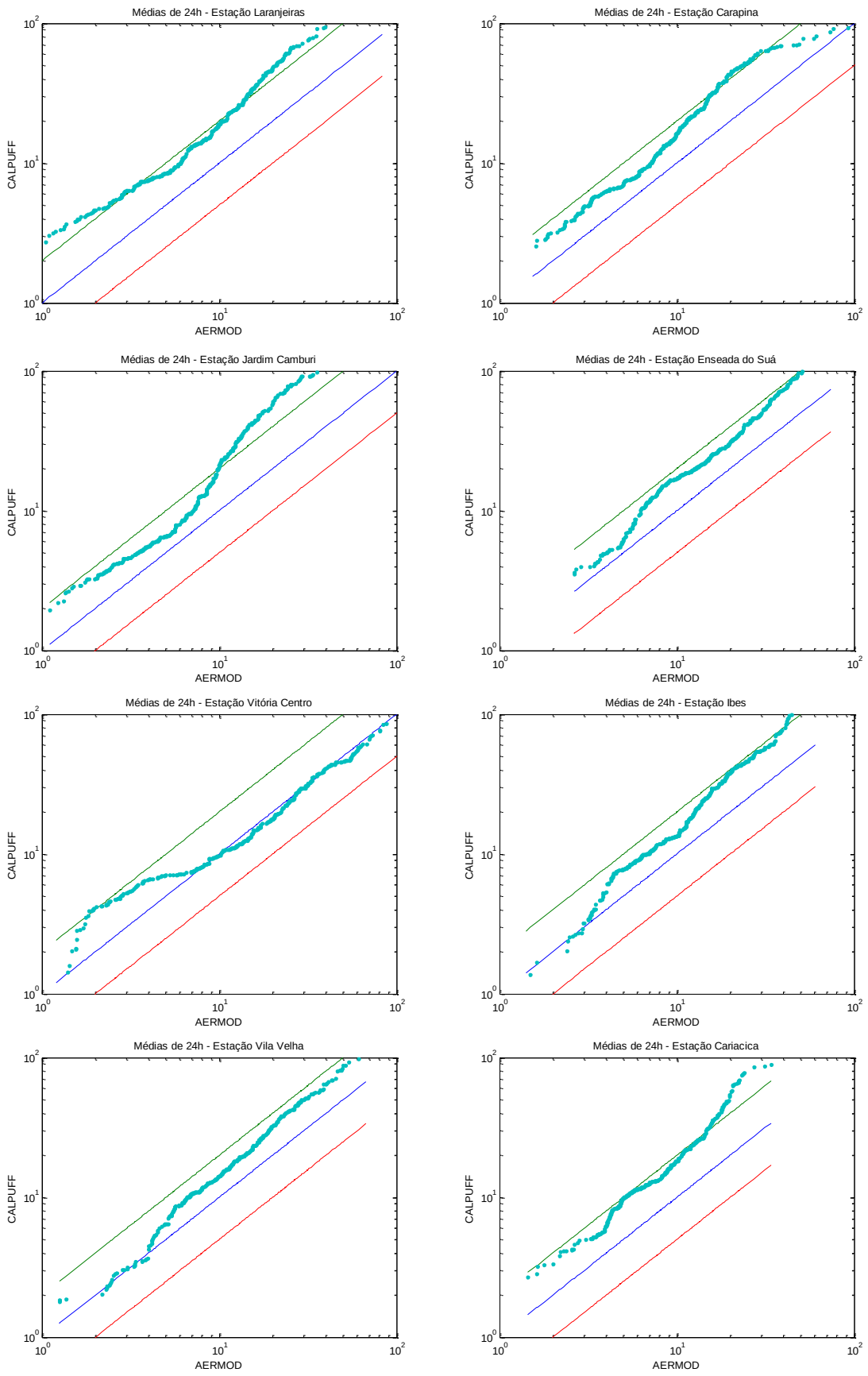

Figura 47 – Gráficos QxQ de comparação entre os modelos em escala logarítma e concentrações em µg/m³ para a média diária para todas as oito estações abordadas neste estudo.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho consiste em um estudo comparativo dos modelos de dispersão atmosférica CALPUFF e AERMOD através da análise da qualidade do ar na Região Metropolitana da Grande Vitória. O estudo foi realizado com base na modelagem do poluente PM_{10} para o Inventário de emissões atmosférica da região da Grande Vitória (IEMA, 2011). O trabalho seguiu as diretrizes desenhadas para o trabalho similar de Silva & Sarnaglia (2010), e de maneira similar foi realizada as análises dos resultados.

Obstáculos de obtenção de dados locais, assim como mencionado por Silva & Sarnaglia, tal como dificuldade de acesso e dados faltantes prejudicam a eficiência da modelagem e geram grande demanda de tempo e esforço para esta etapa. No modelo CALPUFF fez-se o uso de duas estações meteorológicas de superfície para a complementação de todos os dados necessários para o modelo, enquanto o modelo AERMOD fez o uso apenas de uma estação

Observou-se que o esforço computacional exigido CALPUFF em modelagens é muito superior ao do AERMOD. Para simulações realizadas similares a esta, aconselha-se o uso de recursos computacionais mais potentes.

Os modelos utilizados subestimam de uma forma geral as concentrações de poluentes encontradas nas estações da Rede Automática de Monitoramento de Qualidade de Ar da RMGV. Entretanto, conforme ocorre o crescimento dos valores de concentração de poluentes observados pelas estações de monitoramento, os modelos apresentam uma melhor predição dos dados. Pode-se acrescentar também que ambos modelos superestimam as concentrações máximas observadas. As duas afirmações feitas acima são importantes e positivas para a utilização do modelo para funs regulatórios.

Os índices estatísticos do modelo CALPUFF apresentaram melhores valores indicando maior proximidade com a medição real observada pelas estações. O modelo ainda apresenta melhor desempenho através das análises dos gráficos QuantumxQuantum. Pode-se concluir então que o modelo CALPUFF representa melhor a previsão da concentração de poluentes para a Região Metropolitana da Grande Vitória.

Os índices estatísticos encontrados nesse estudo apresenta valores melhores quando comparado ao estudo da região realizado por Silva & Sarnaglia (2010). Essa diferença pode ser atribuída pelo uso de variações horárias de fontes móveis neste, não utilizado no estudo de Silva & Sarnaglia (2010) junto de outros possíveis fatores não determinados.

A estação Enseada do Suá foi a que apresentou os melhores índices em comparação com as outras sete estações componentes do RAMQAr. O estudo Silva e Sarnaglia (2010) também concluiu ser esta a estação com melhor desempenho no estudo. Entretanto, afirmações sobre desempenho das estações não podem ser tomadas com base nos dados obtidos nesse estudo.

A seguir é realizada um descritivo das recomendações sugeridas para trabalhos posteriores semelhantes que façam o uso de modelagem da qualidade do ar. .

Tendo em vista a redução do esforço para obtenção dos dados metereológicos e a dificuldade frente à falta de dados recomenda-se o uso do modelo de previsão meteorológica Wheater Research Forecast (WRF) para a entrada de dados nos modelos de qualidade do ar. O uso do WRF ainda descarta situações nas quais os dados das estações não possuam muita confiabilidade, devido a falta de manutenção, localizações não ideais e outros motivos.

Recomenda-se também que um novo estudo seja realizado com a tentativa de incluir as fontes residenciais e comerciais não incluídas na modelagem através do CALPUFF. Vicentini (2011) encontrou um problema similar para o uso de fontes de área no calpuff para a modelagem de fontes industriais, a solução encontrada pelo autor foi o uso de alturas fictícias para as fontes, dadas pela média ponderada das emissões industriais contidas em cada célula, tendo a taxa de emissão como fator de ponderação. Recomenda-se então a realização de novas metodologias para o tratamento dessas fontes de área no CALPUFF, algumas opções seriam a divisão das fontes com espaçamento menor que 500 metros ou diferentes alturas de emissão daquelas levantadas no Inventário da Região Metropolitana da Grande Vitóroa (2010).

Outra sugestão é um estudo similar ao colocado no paragráfo anterior para as fontes móveis. Recomenda-se a modelagem dessas fontes através de novas metodologias para fonte de área e também como fontes de volume e fontes pontuais.

Para um melhor estudo do desempenho dos modelos para a região, estudos com outros poluentes que envolvam a transformação química podem ser realizados, pois estudo nao faz o uso desse fenômeno. Uma sugestão também seria a realização do estudo com formação de particulado secundário.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATMOSPHERIC STUDY GROUP OF TRC (ASG). **CALPUFF Modeling System**. **Version 6**. **User Instructions**. April 2011. Disponível em: < http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_Version6_UserInstructions.pdf >. Acesso em 15 junho de 2012.

BARRAT, R., 2001. **Atmospheric Dispersion Modelling: An Introduction to Practical Applications.** Editora Earthscan. Londres.

BORGE, R., ALEXANDROV, V., VAS, J. J., LUMBRERAS, J. RODRÍGUEZ, E., 2008. **A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula.** Atmospheric Environment 42, 8560 - 8574.

CAPUTO, M., GIMÉNEZ, M., SCHLAMP, M., 2002. **Intercomparison of atmospheric dispersion models.** Atmospheric Environment 37, 2435 - 2449.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 03 de 1990**. Brasília, 1990.

EPA. **Revision to the guideline on air quality models: Adoption of a preferred general purpose (flat and complex terrain) dispersion model and other revisions.** North Carolina, U.S. Environmental Protection Agency, Federal Register, v. 70, n. 216 / Rules and Regulations, Appendix W of 40 CRF Part 51. 2005

ESPÍRITO SANTO EM FOCO. **Dados gerais - RMGV**. Disponível em: < http://www.vitoria-es-brasil.com/>. Acesso em: 07 de junho de 2012.

GSHHS. **Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline**. National Geophysical Data Center. NOAA. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/data/gshhs/oldversions/version1.10/>. />. Acesso em: 20 de abril de 2012

HANNA, S. R., CHANG, J. C., FERNAU, M. E., 1998. **Monte Carlos estimates of uncertainties in predictions by a photochemical grid model (UAM-IV) due to uncertainties in input variables.** Atmospheric Environment 32, 3419 - 3628.

HOLTON, J. R. **An introduction to dynamic meteorology.** 4ª Ed DAS. Seattle, Washington.2004

INDUMATI, S., OZA, R. B., MAYYA, Y. S., PURANIK, V. D., KUSHWAHA, H. S., 2009. **Dispersion of pollutants over land-water-land interface: Study using CALPUFF model.** Atmospheric Environment 43, 473 - 478.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – IEMA, 2008. **Relatório da qualidade do ar na região da Grande Vitória – 2007**. Cariacica.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - IEMA, 2011. **Inventário de emissões atmosférica da região da Grande Vitória.** Vitória - ES. Brasil.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – IEMA. **Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar da Região da Grande Vitória**. Disponível em: <http://www.meioambiente.es.gov.br/default.asp>. Acesso em: 07 de junho de 2012.

KESARKAR, A. P., DALVI, M., KAGINALKAR, A., OJHA, A., 2007. **Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for pollutant dispersion modeling. A case study for PM_{10} dispersion over Pune, India**. Atmospheric Environment 41, 1976 - 1988.

MACINTOSH, D. L., STEWART, J. H., MYATT, T. A., SABATO, J. E., FLOWERS, G. C., BROWN, K. W., HLINKA, D. J., SULLIVAN, D. A., 2010. **Use of CALPUFF for exposure assessment in a near-field, complex terrain setting.** Atmospheric Environment 44, 262 - 270.

MELO, A. M. V. **Avaliação de desempenho dos modelos AERMOD e CALPUFF associados ao modelo prime.** Universidade Federal do Espírito Santo. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. 2011.

MORAES,Marcelo Romero de; **Ferramentas para a previsão de vento e dispersão de poluentes na micro-escala atmosférica**. 2004. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina.

NOAA**. ESRL Radiosonde Database.** National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Earth System Research Laboratory (ESRL). Global Systems Division (GSD). Disponivel em: <http://esrl.noaa.gov/raobs/>. Acesso em 04 de maio de 2012.

OSHAN, R., KUMAR, A., MASURAHA, A. **Application of the USEPA`s CALPUFF MODEL to an Urban Area.** Department of Civil Engineering, University of Toledo**.** Toledo. 2006

POPE, C.A.III., BURNETT, R.T., THUN, M.J., CALLE, E.E., KREWSKI, D., ITO, K.,& THURSTON, G.D. **Lung Cancer, Cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution.** JAMA 2002;

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, 5 de outubro de 1988.

RANDOJIC, Z.; GARISTO, N. C.; **An assessment of the suitability of Air Dispersion Models to predict contaminant concentrations in air due to industrial emissions**. Richmond Hill, Ontario. 2004.

REIS, N. C. J. Módulo IV - **Monitoramento da Qualidade do Ar**, 2009. Disponivel em: <http://www.inf.ufes.br/~neyval/Rec_Atm%28moduloIV%29.pdf>. Acesso em: 08 Dezembro de 2011.

SANTIAGO, A. M. **Simulação da camada limite planetária sobre a região metropolitana da grande vitória com o uso do modelo de mesoescala WRF.**

Universidade Federal do Espírito Santo. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. 2009.

SAX, T., ISAKOV, V., 2002. **A case study for assessing uncertainty in local-scale regulatory air quality modeling applications.** Atmospheric Environment 37, 3481 - 3489.

SEIBERT, P.; BEYRICH, F.; GRYNING, S.; JOFFRE, S.; RASMUSSEN, A.; TERCIER, P.. **Mixing Height Determination for Dispersion Modelling**. 1997.

SEINFELD, J.H; PANDIS, S.N. ***Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. Wiley** –Interscience, 2ª ed, 2006.

SILVA, A. M.; SARNAGLIA, V. D. M.; **Estudo da Qualidade do Ar na Região Metropolitana da Grande Vitória Empregando um Modelo de Dispersão Atmosférica - CALPUFF**. Monografia (Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo. 2010

SOARES, M. S. **Avaliação do Sistema de Modelagem Calpuff Aplicado ao Dióxido de Enxofre para as Bacias Aéreas I, II E III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Monografia (Metereologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010

STULL, R. B. ***An introduction to boundary layer meteorology.*** Kluwer Academic Publishers. 7th edition. 1988.

TROEN, I.; PETERSEN, E. L.; **European Wind Atlas**. Risø National Laboratory, Roskilde. 1989.

TURNER, D. B. ***Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling.*** **Lewis Publishers**, 2ª ed., 1994.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **The pollutant standards index. Measuring air quality**. Washington – D.C., 1994;

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **AERMOD: Description of Model Formulation**. Research Triangle Park, North Carolina. 2004a.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET)**. Research Triangle Park, North Carolina. 2004b.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor (AERMAP).** Research Triangle Park. North Carolina, 2004c.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model - AERMOD.** Research Triangle Park. North Carolina, 2004d.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA)**. Preferred and Recommended Models.** Disponível em: < http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm>. Acesso em 07 de novembro de 2011.

UNITED STATED GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Global Data Explorer**. Disponível em: < http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>. Acesso em 10 de março de 2012.

U.S. Geological Survey (USGS). **Shuttle Radar Topography Mission 30 meters (SRTM3) – América do Sul**. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. U.S. Department of Interior. Disponível em: < http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/South_America/>. Acesso em 02 de maio de 2012.

U.S. Geological Survey (USGS). **South America Land Cover Characteristics Data Base Version 2.0**. Global Land Cover Characterization. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. U.S. Department of Interior. Disponível em: < http://edc2.usgs.gov/glcc/tablambert_sa.php>. Acesso em 07 de junho de 2012.

VANCOUVER ISLAND ENERGY CORPORATION**. Questions posed by VIGP Technical Working Group, answers provided by Vancouver Island Energy Corporation.** October 18, 2002

VICENTINI, P. C. **Uso de modelos de qualidade do ar para a avaliação Do efeito do proconve entre 2008 e 2020 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Tese de Doutorado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação E Pesquisa De Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

WANG, L., PARKER, D. B., PARNELL, C. B., LACEY, R. E., SHAW, B. W., 2006. **Comparison of CALPUFF and ISCST3 models for predicting downwind odor and source emission rates.** Atmospheric Environment 40, 4663 - 4669.

Wark, K., C. Warner, and W.T. Davis. **Air Pollution Control: Its Origin and Control**, 3rd Edição, Addison Wesley Publishers (Now Prentice Hall), publicado em Janeiro, 1998. Korean

World Health Organization (WHO). **WHO Air quality guidelines for particulare matter, ozone, nitrogem, dioxide and sulfur**. Global update 2005.

YAUL, K. *et al*. **Inter-comparison of the AUSTAL2000 and CALPUFF dispersion models against the Kincaid data set.** Lakes Environmental Software Inc. Waterloo, Canada. 2005

ZOU, B., ZHAN, F. B., WILSON, J. G., ZENG, Y., 2010. **Performance of AERMOD at differente times scales.** Simulation Modelling Practice and Theory 18, 612 - 623.

ANEXO I - ARQUIVO DE ENTRADA DA PRIMEIRA ETAPA DO AERMET

```
JOB
 MESSAGES   ONSITE.MSG
 REPORT     ONSITE.RPT

ONSITE
 DATA       DADOS.MET
 XDATES     10/01/01 TO 10/12/31
 LOCATION   99999 20.23S 40.24W 3
 QAOUT      STAGE1.DSK
 OSHEIGHTS  10
 READ 1     OSYR OSMO OSDY OSHR PAMT PRES INSO RH01 WD01 TT01 WS01 MHGT
 FORMAT 1   (4(I2,2X),F5.1,2X,F6.0,2X,F5.0,2X,F5.1,2X,F4.0,2(2X,F4.1),2X,F5.0)
 AUDIT      PAMT PRES INSO RH01 WD01 TT01 WS01
 RANGE WD   0 <= 360 999
 RANGE PAMT 0 <= 434 999
 RANGE PRES 990 < 10300 99999
 RANGE INSO 0 < 1100 9999
 RANGE TT   10 < 40 99
 RANGE RH   32 <= 100 999
 RANGE WS   0 <= 6 99
 THRESHOLD  0.3
```

Figura 48 - Arquivo de entrada da primeira etapa do AERMET.

ANEXO II - ARQUIVO DE ENTRADA DA SEGUNDA ETAPA DO AERMET

```
JOB
 REPORT    MERGE.RPT
 MESSAGES  MERGE.MSG

ONSITE
 QAOUT     STAGE1.DSK

MERGE
 OUTPUT    STAGE2.DSK
 XDATES    10/01/01 10/12/31
```

Figura 49 - Arquivo de entrada da segunda etapa do AERMET.

ANEXO III - ARQUIVO DE ENTRADA DA TERCEIRA ETAPA DO AERMET

```
JOB
 REPORT    MERGE.RPT
 MESSAGES  MERGE.MSG

METPREP
 DATA        STAGE2.DSK
 LOCATION    99999 20.23S 40.24W 3
 OUTPUT      AERMET.SFC
 PROFILE     AERMET.PFL
 FREQ_SECT   ANNUAL 1
 SECTOR      1 0 360
 SITE_CHAR   1 1 0.15 2.00 0.9
```

Figura 50 - Arquivo de entrada da terceira etapa do AERMET.

ANEXO IV –ARQUIVO DE CONTROLE DO CALMET

```
CALMET.INP      2.1             Hour Start and End Times with
Seconds
CALMET DISPERAO PM10 RMGV 2010
50 x 70  1 km meteorological grid -- wind & met model
Met. stations used: 2 surface, 1 upper air, 1 precip., 0
overwater
---------------- Run title (3 lines)
-----------------------------------------

                    CALMET MODEL CONTROL FILE
                    -------------------------

-------------------------------------------------------------------
--------------

INPUT GROUP: 0 -- Input and Output File Names


Subgroup (a)
------------
Default Name  Type          File Name
------------  ----          ---------
GEO.DAT       input    ! GEODAT=geo.dat       !
SURF.DAT      input    ! SRFDAT=surf.dat      !
CLOUD.DAT     input    * CLDDAT=            *
PRECIP.DAT    input    ! PRCDAT=precip.dat    !
WT.DAT        input    * WTDAT=             *

CALMET.LST    output   ! METLST=CALMET.LST     !
CALMET.DAT    output   ! METDAT=CALMET.DAT    !
PACOUT.DAT    output   * PACDAT=            *
```

Figura 51 – Começo do arquivo de entrada .inp do CALMET.

.

.

ANEXO V - DADOS METEOROLÓGICOS

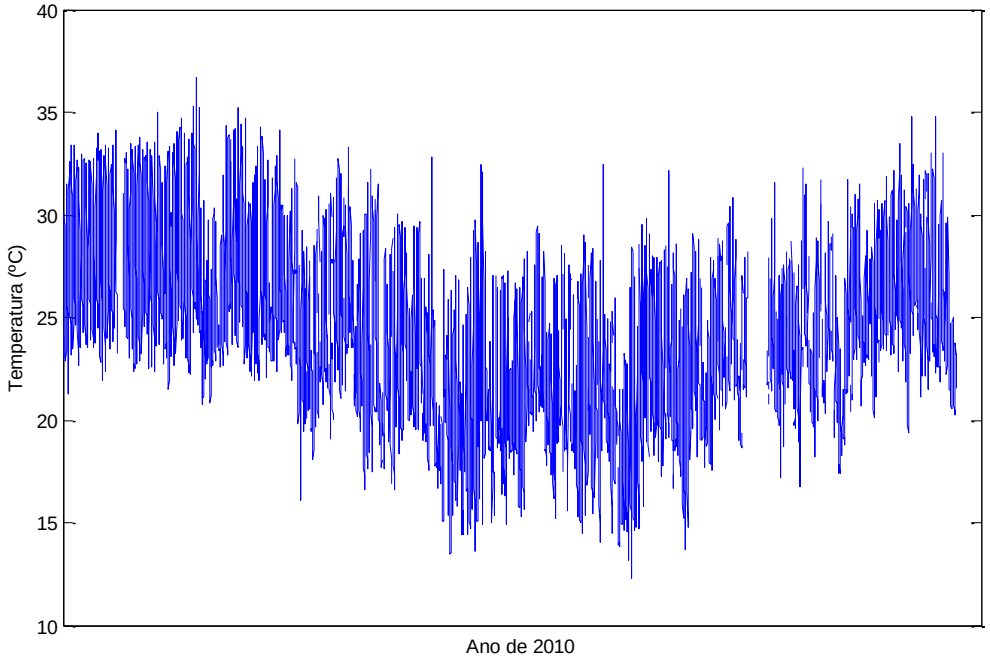

Figura 52 - Temperatura ao longo do ano de 2010. Estação Carapina.

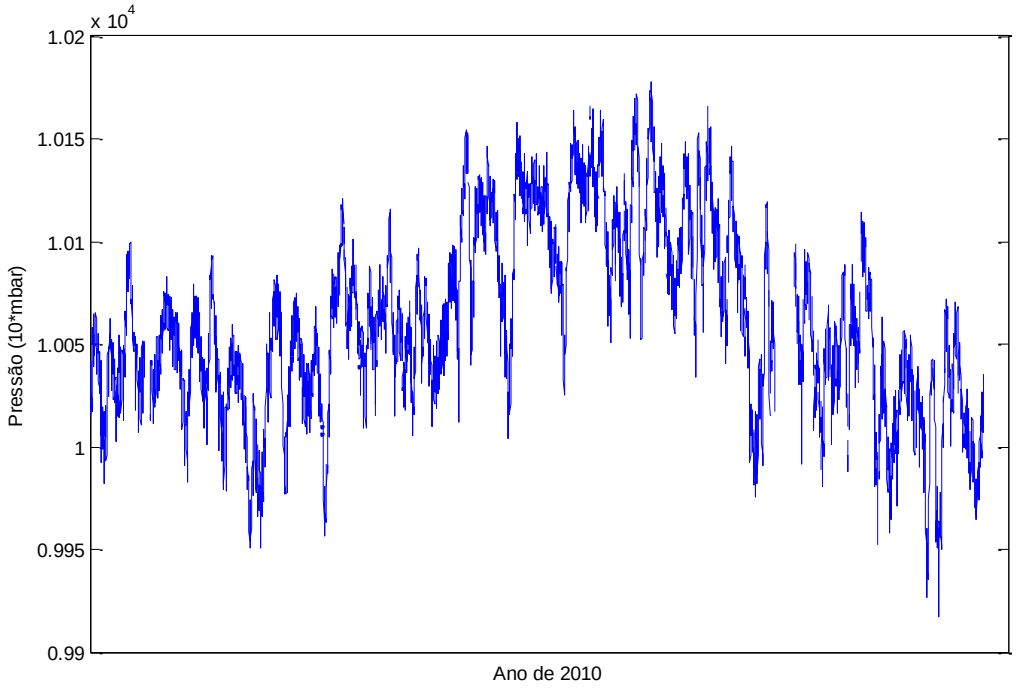

Figura 53 - Pressão ao longo do ano de 2010. Estação Carapina.

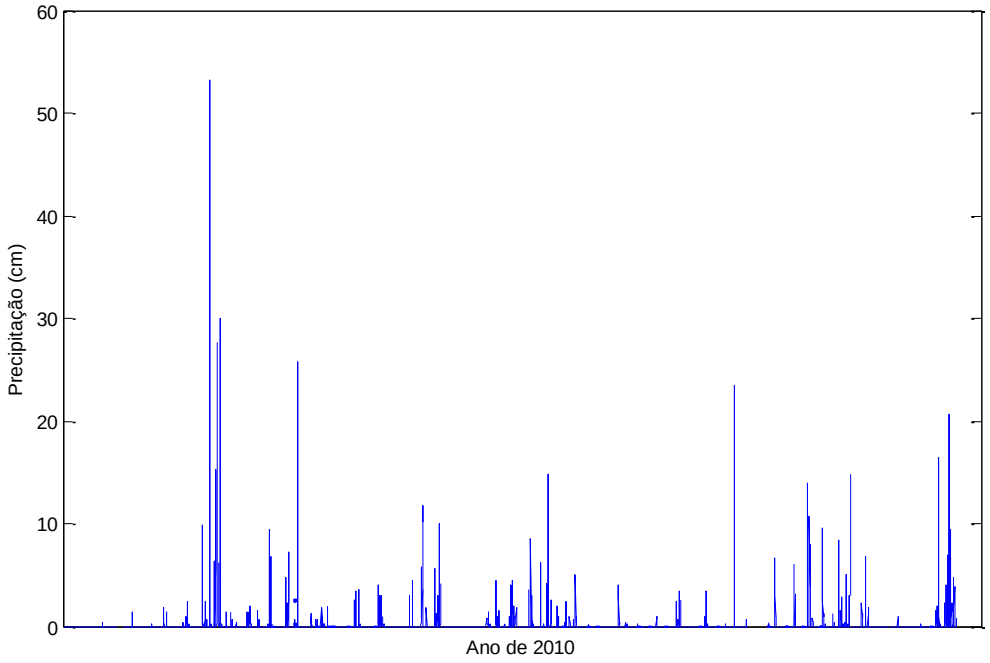

Figura 54 - Precipitação ao longo do ano de 2010. Estação Carapina.

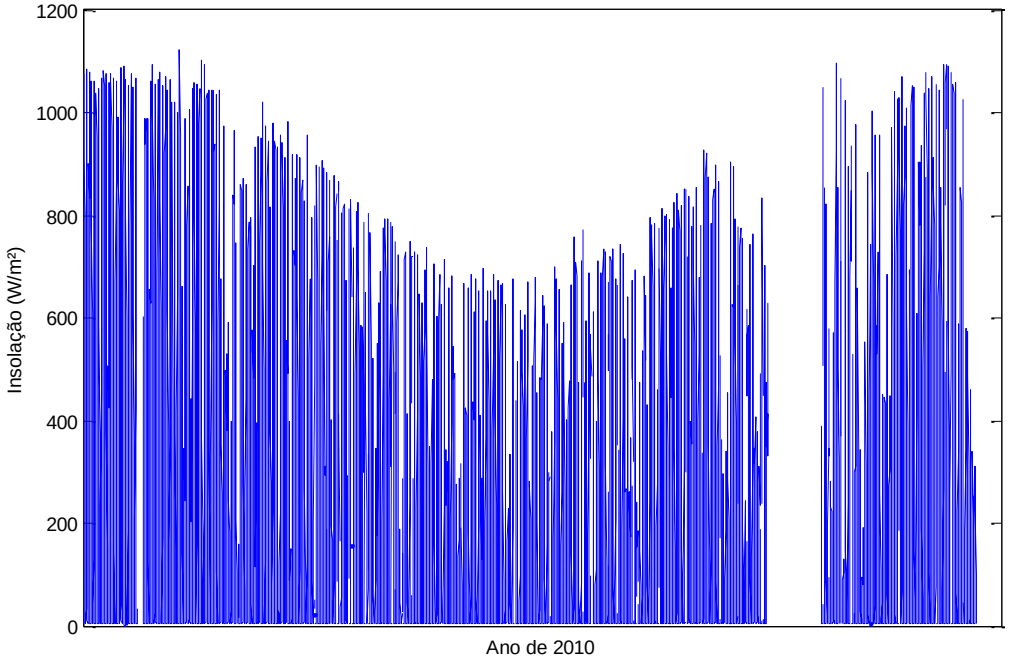

Figura 55 - Insolação ao longo do ano de 2010. Estação Carapina.

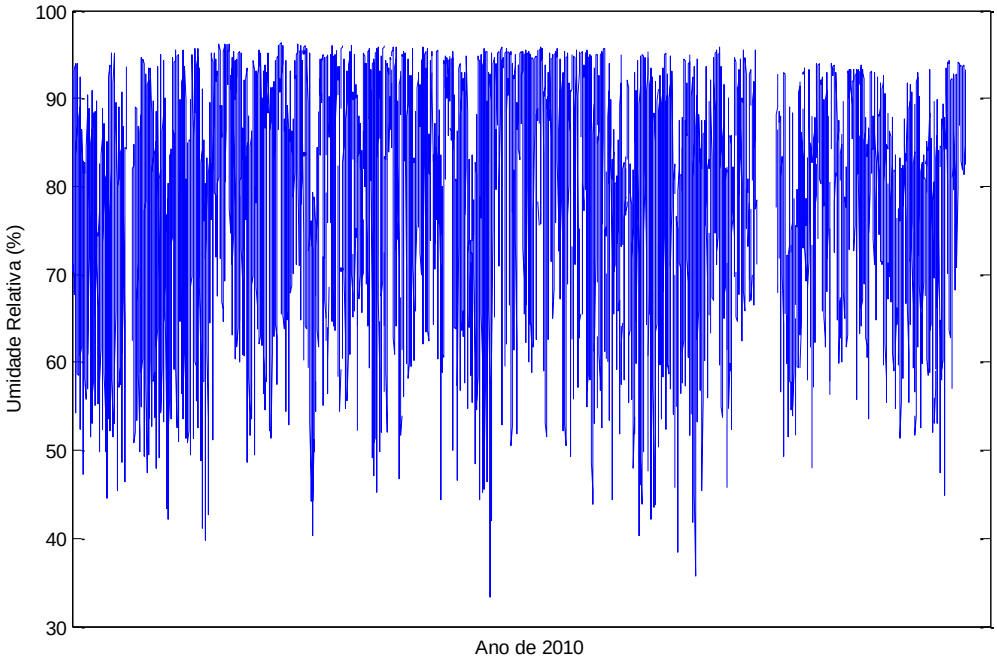

Figura 56 - Umidade relativa ao longo do ano de 2010. Estação Carapina.

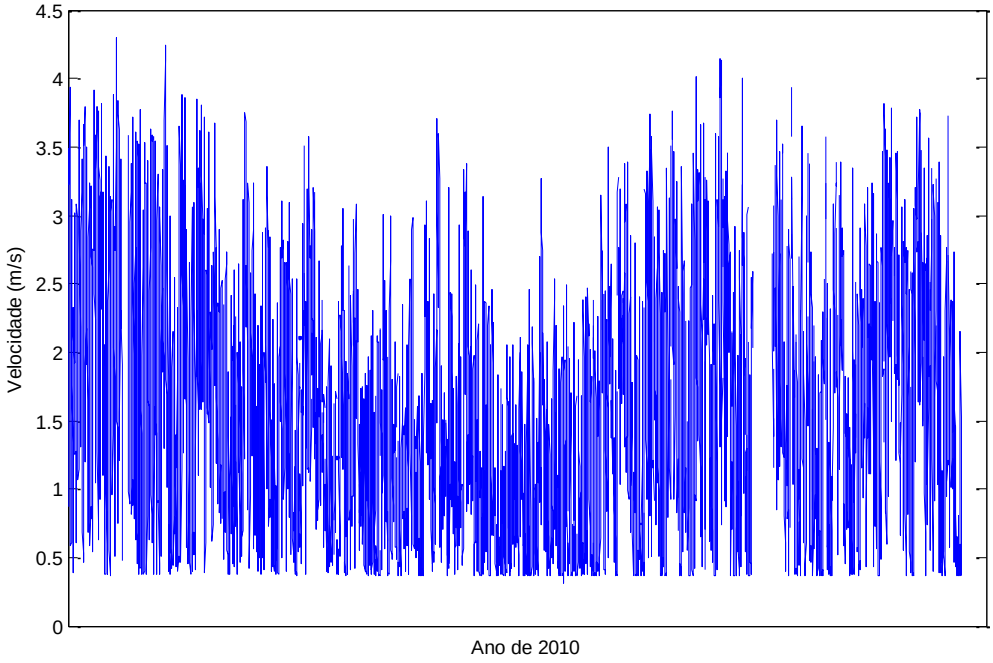

Figura 57 – Velocidade do vento ao longo do ano de 2010. Estação Carapina.

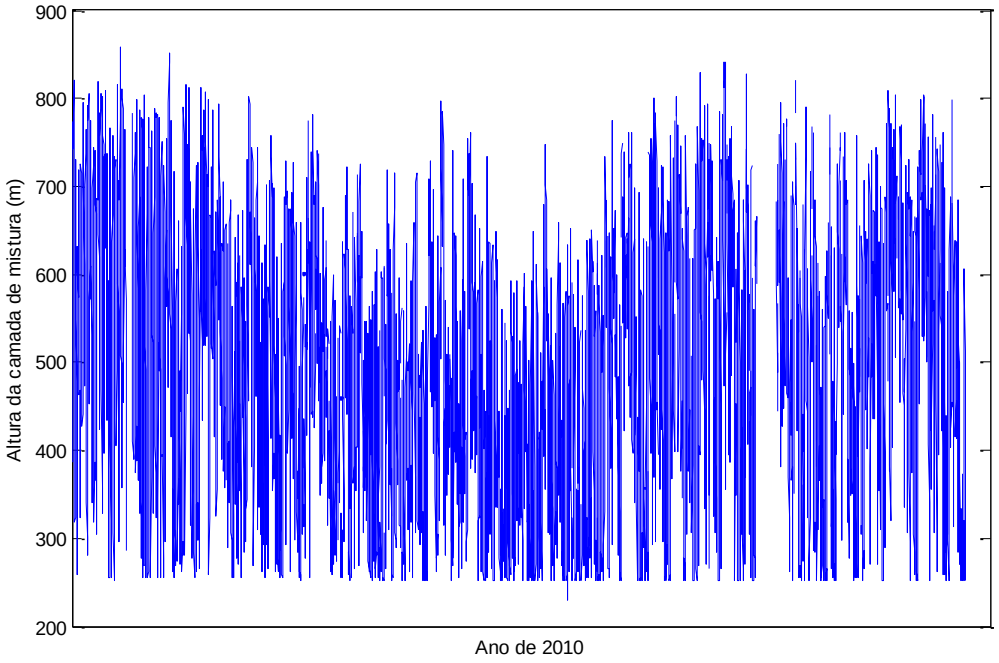

Figura 58 - Altura da camada de mistura ao longo do ano de 2010. Estação Carapina.

ANEXO VI - ARQUIVO DE ENTRADA DO AERMAP

```
CO STARTING
   TITLEONE Modelagem de PM10 na Grande Vitoria
   DATATYPE NED
   DATAFILE DADOS_GEOGRAFICOS.TIF
   DOMAINXY 334000. 7729000. -24 386000. 7801000. -24
   ANCHORXY 334000. 7729000. 334000. 7729000. -24 3
   RUNORNOT RUN
CO FINISHED

SO STARTING
   LOCATION 3   POINT 357974.5143 7750147.7174 22.45
   LOCATION 4   POINT 357983.5143 7750154.7174 25.95
   LOCATION 1   VOLUME 365773.187  7759882.4222 3
   LOCATION 2   VOLUME 365194.3024 7759322.9858 2
   LOCATION 6   VOLUME 357955.2349 7749143.4215 3
   LOCATION 97  AREAPOLY 369425.0518 7761018.8556 11
   LOCATION 280 AREAPOLY 353276.1824 7752189.0455 5
   LOCATION 281 AREAPOLY 364888.3757 7768697.0712 5

SO FINISHED

RE STARTING
   DISCCART 369870.0000 7761515.0000
RE FINISHED

OU STARTING
   RECEPTOR AERMAP.ROU
   SOURCLOC AERMAP.SOU
OU FINISHED
```

Figura 59 - Arquivo de entrada do AERMAP com apenas algumas fontes.

ANEXO VII - ARQUIVO DE ENTRADA DO AERMOD

```
CO STARTING
   TITLEONE Modelagem de PM10 na Grande Vitoria
   MODELOPT CONC NOCHKD
   AVERTIME 1 ANNUAL
   POLLUTID PM10
   RUNORNOT RUN
   EVENTFIL EVENTS.OUT
   ERRORFIL ERRORS.OUT
CO FINISHED

SO STARTING
   LOCATION 3   POINT 357974.5143 7750147.7174 22.45
   SRCPARAM 3   0.0067889   22.45 416.38 4.6003    0.98
   LOCATION 1   VOLUME 365773.187  7759882.4222 3
   SRCPARAM 1   0.52698     3     200    1.4
   LOCATION 97  AREAPOLY 369425.0518 7761018.8556 11
   SRCPARAM 97  1.9759e-007 11  4
   AREAVERT 97  369425.0518 7761018.8556 370451.3408 7761018.8556 370451.3408 7762717.4427 369425.0518 7762717.4427
   LOCATION 828 AREAPOLY 361418.741  7752452.1112 1
   SRCPARAM 828 0.0001516   1  4
   AREAVERT 828 361418.741  7752452.1112 361436.741  7752452.1112 361796.7317 7752588.799  361778.7317 7752588.799
   EMISFACT 828 HROFDY 0.14 0.10 0.07 0.06 0.07 0.12 0.42 0.88 0.90 0.85 0.81 0.87 0.90 0.86 0.78 0.79 0.85 1.00 0.98 0.85 0.64 0.56 0.50 0.27
   SRCGROUP ALL
SO FINISHED

RE STARTING
   INCLUDED AERMAP.ROU
RE FINISHED

ME STARTING
   SURFFILE AERMET.SFC
   PROFFILE AERMET.PFL
   SURFDATA 99999 2010
   UAIRDATA 99999 2010
   SITEDATA 99999 2010
   PROFBASE 0.0 METERS
ME FINISHED

OU STARTING
   DAYTABLE 1
OU FINISHED
```

Figura 60 - Arquivo de entrada do AERMOD.

ANEXO VIII - ARQUIVO DE ENTRADA DO CALPUFF

```
CALPUFF.INP     2.0             File version record
CALPUFF DISPERSAO PM10 RMGV 2010
50x70 - GRID 1KM
---------------- Run title (3 lines)
-------------------------------------------

                    CALPUFF MODEL CONTROL FILE
                    --------------------------

-------------------------------------------------------------------
--------------

INPUT GROUP: 0 -- Input and Output File Names

--------------
Default Name  Type          File Name
------------  ----          ---------
CALMET.DAT    input    ! METDAT =C:\CALPUFF\CALMET.DAT   !
    or
ISCMET.DAT    input    * ISCDAT =             *
    or
PLMMET.DAT    input    * PLMDAT =             *
    or
PROFILE.DAT   input    * PRFDAT =             *
SURFACE.DAT   input    * SFCDAT =             *
RESTARTB.DAT  input    * RSTARTB=             *
-------------------------------------------------------------------
---------------
CALPUFF.LST   output   ! PUFLST =CALPUFF_A.LST  !
CONC.DAT      output   ! CONDAT =CALPUFF_A.DAT     !
DFLX.DAT      output   * DFDAT  =             *
WFLX.DAT      output   * WFDAT  =             *
```

Figura 61 – Começo do arquivo de entrada do CALPUFF.