



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



ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO DA QUALIDADE DO AR NA REGIÃO URBANA DE PORTO
ALEGRE: VARIABILIDADE DAS CONCENTRAÇÕES DO
PARÂMETRO PARTÍCULAS INALÁVEIS**

FILIFE GAUDIE LEY LINDAU

Orientador: Prof. Carlos Alberto Krahl

Co-orientador: Eng. Químico Fabiano Porto da Fontoura

Porto Alegre, Novembro de 2011

Agradecimentos

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por proporcionar um ensino de qualidade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química e, também, aos professores que ministram as demais disciplinas do curso, pela dedicação na transmissão do conhecimento.

Ao professor orientador Carlos Alberto Krahl, pelo interesse e pelas sugestões em relação ao tema e ao desenvolvimento do trabalho.

À Equipe de Controle e Combate à Poluição Hídrica e Atmosférica da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (ECCPHA/SMAM), pelo conhecimento adquirido durante o período em que lá estagiei, pelo apoio em todas as fases do trabalho e por despertar meu interesse nesta linha de pesquisa.

Ao Eng. Químico da ECCPHA Fabiano Porto da Fontoura, pelo conhecimento transmitido sobre o monitoramento e a qualidade do ar e pela ajuda nas etapas de criação e desenvolvimento do trabalho.

À professora Heloisa Gaudie Ley Lindau, pelo entusiasmo, por suas sugestões e pelas indicações literárias.

Ao professor Jefferson Cardia Simões, por despertar novas perspectivas em relação ao tema.

Aos colegas de graduação, pelas ideias compartilhadas.

À minha família, em especial, aos meus pais, João Carlos e Heloisa e ao meu irmão Marcos, pelo apoio a qualquer hora, pela motivação e pela compreensão.

Resumo

As concentrações de partículas inaláveis (PM10) medidas em Porto Alegre por três estações de monitoramento da qualidade do ar localizadas na zona urbana do município, no período de janeiro de 2009 a agosto de 2011, foram analisadas. A estação Centro da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMAM) forneceu concentrações médias horárias e diárias de PM10, enquanto as duas estações da Fundação de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul (FEPAM) forneceram concentrações médias diárias, a cada seis dias, de PM10. Dados meteorológicos diários foram obtidos de três diferentes pontos de monitoramento no município.

Analizou-se a variabilidade espacial na concentração de PM10, entre as três estações e analisaram-se, também, as variabilidades horária, diária, mensal e anual, mas essas somente para a estação Centro. Utilizou-se o método da análise de variância de um fator, com o auxílio do método de Tukey para indicar entre quais grupos houve diferenças significativas.

As concentrações obtidas estavam, todas, abaixo do padrão estabelecido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). A zona Norte de Porto Alegre, os períodos da manhã e da noite, os meses de inverno e o ano de 2011 apresentaram as maiores concentrações médias de PM10, com diferenças significativamente maiores em relação às outras condições. Destacaram-se, como prováveis motivos para tais resultados, os eventos de inversão térmica de superfície bem como a influência de emissões oriundas de outras regiões, como as grandes queimadas e as erupções vulcânicas.

Sumário

Resumo.....	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas e Siglas	vii
1.Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	2
2.1. Composição e Dinâmica da Atmosfera	2
2.2. Poluição Atmosférica	3
2.3. Material Particulado e Partículas Inaláveis	4
2.4. Monitoramento do Material Particulado.....	6
2.5. Meteorologia Aplicada na Dispersão de Particulados	9
2.6. Análise de Variância de Um Fator	10
3. Materiais e Métodos	14
3.1. Coleta e Obtenção dos Dados	14
3.2. Tratamento Estatístico	16
4. Resultados	17
4.1. Variabilidade Espacial.....	18
4.2. Variabilidade Horária	19
4.3. Variabilidade Diária	21
4.4. Variabilidade Mensal.....	22
4.5. Variabilidade Anual	25
5. Conclusões.....	27
6. Referências.....	28
Anexo A - Normais Climatológicas	31
Anexo B – Direção e Velocidade dos Ventos.....	32
Anexo C – Dispersão das Cinzas Oriundas de Queimadas	34
Anexo D – Dispersão das Cinzas Vulcânicas	35

Lista de Figuras

Figura 2.1. Analisador por atenuação de radiação beta (adaptação de Opsis, 2007).	6
Figura 2.2. Determinação da massa de PM10 por atenuação de radiação beta (adaptação de US EPA, 1999).	7
Figura 2.3. Entrada de ar ambiente nos amostradores de grandes volumes para monitoramento de PM10 (adaptação de US EPA, 1999).	8
Figura 2.4. Parâmetros estatísticos apresentados nos box plots.	11
Figura 3.1. Localização das estações (adaptação de Google Maps, 2011).	15
Figura 4.1. Concentrações médias diárias de PM10 utilizadas na análise de variabilidade espacial.	17
Figura 4.2. Box plot das concentrações médias diárias de PM10 nos três locais de amostragem.	18
Figura 4.3. Box plot das concentrações médias horárias de PM10 na estação Centro.	20
Figura 4.4. Comportamento, na terça-feira dia 14/06/2011, da concentração horária de PM10, na estação Centro, frente às mudanças nos parâmetros meteorológicos em função da hora do dia.	21
Figura 4.5. Box plot para concentração média diária de PM10 nos diferentes dias da semana, de janeiro de 2009 a agosto de 2011.	22
Figura 4.6. Box plot das concentrações médias diárias de PM10, agrupadas nos meses considerados, na estação Centro.	23
Figura 4.7. Evolução mensal média dos focos de queima de 2000 a 2010 (fonte INPE, 2011). .	24
Figura 4.8. Box plot das concentrações médias diárias de PM10 na estação Centro, agrupadas nos três anos de estudo.	25
Figura 4.9. Evolução do volume acumulado mensal de chuva em comparação com a média histórica (M.H.).....	26

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. IQAr utilizado pela FEPAM para o PM10.	4
Tabela 2.2. Métodos de determinação de parâmetros meteorológicos (adaptação de US EPA, 2008).	11
Tabela 2.3. Tabela para ANOVA de um fator	13
Tabela 3.1. Origem e caracterização dos dados meteorológicos.	15
Tabela 3.2. Organização dos dados para o cálculo da ANOVA.	16
Tabela 4.1. Método de Tukey aplicado aos dias da semana.	22
Tabela 4.2. Resposta da concentração média diária de particulados frente à presença de cinzas vulcânicas sobre a região de Porto Alegre.	27

Lista de Abreviaturas e Siglas

a – Número de grupos em que a amostra foi dividida

8° Disme – 8° Distrito de Meteorologia

ANOVA – Análise de Variância

CLP – Camada Limite Planetária

CPPMet/ UFPEL – Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas da Universidade Federal de Pelotas

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

$\hat{C}_{p,ar}$ – Capacidade calorífica do ar a pressão constante (kJ/kgmol/K)

DETRAN-RS – Departamento Estadual de Trânsito do Rio Grande do Sul

EPTC – Empresa Pública de Transporte e Circulação

F0 – Teste estatístico F

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul

g – Aceleração da gravidade (m/s²)

H – Hipótese

HV – Amostrador de Grandes Volumes

I – Intensidade da radiação beta

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais

IQAr – Índice de Qualidade do Ar

LI – Limite inferior dos valores da amostra

LS – Limite superior dos valores da amostra

N – Tamanho da amostra

n – Número de valores (observações) no grupo

OMS – Organização Mundial da Saúde

P – Valor P

PM_{2,5} – Material Particulado com Diâmetro Aerodinâmico de até 2,5µm

PM₁₀ - Material Particulado com Diâmetro Aerodinâmico de até 10µm

PMPA – Prefeitura Municipal de Porto Alegre

PTS – Partículas Totais em Suspensão

Q - Quartil

q_{α} – Amplitude studentizada

RTPM – Monitoramento de Partículas em Tempo Real

SMAM – Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Porto Alegre

SQE – Soma dos quadrados entre níveis
SQR – Soma dos quadrados residual
SQT – Soma dos quadrados total
T – Temperatura do ar (K)
T.. – Soma de todos os valores da amostra
T_α – Teste de Tukey
UR – Umidade relativa (%)
US EPA – Agência de Proteção Ambiental dos EUA
w – Concentração de vapor de água no ar (kgmol/m³)
x – Variável de resposta no teste estatístico
X_m – Massa de PM10 (μg)
y – Dados da amostra
ȳ - Média das observações
z – Altura da parcela de ar (m)
α – Nível de significância
Γ – Gradiente adiabático de temperaturas numa atmosfera estável
ΔH_v – Entalpia de vaporização da água (kJ/kgmol)
ε – Erro aleatório no modelo estatístico
Λ – Gradiente adiabático de temperaturas numa atmosfera não estável
μ – Média geral dos dados
τ – Efeito do grupo no modelo estatístico

1. Introdução

Quando o ciclo de vida útil dos produtos gerados por nossa sociedade tecnológica chega ao fim, o que em média demora alguns dias, a atmosfera torna-se um dos seus principais destinos. Pode-se afirmar, ainda, que esse é o destino mais democrático, pois as emissões, tanto de gases como de particulados, transportadas por massas de ar e/ou atuando no clima, atingem uma escala global. Efeitos ligados à poluição atmosférica como alterações climáticas são, portanto, registrados desde as regiões mais industrializadas do hemisfério Norte do planeta até a região Antártica.

Outros processos regulam também a composição atmosférica, que já apresentou grandes variações no decorrer da história da Terra. As primeiras bactérias fotossintetizantes foram responsáveis por um grande aumento na concentração de oxigênio, numa atmosfera em que antes predominavam os gases hidrogênio e metano, que se estima ter ocorrido há 2,3 bilhões de anos. Um exemplo ainda atuante são as grandes erupções vulcânicas, que lançam na atmosfera elevadas quantidades de material particulado, além de gases como os dióxidos de enxofre e de carbono.

Porém, da mesma forma que esses eventos são considerados referências na escala geológica de tempo, a revolução industrial, no século XVIII, deve constar como marco na alteração, por atividades antrópicas, da composição atmosférica. A partir desse período começaram os registros, por parte da população urbana, dos primeiros episódios de poluição atmosférica, principalmente, por material particulado em suspensão.

O aumento da população nos países em fase de maior de expansão industrial somado ao processo de aglomeração da população em grandes centros urbanos, aos incentivos ao consumismo extremo e aos crescentes investimentos na indústria petroquímica tornou a exposição à poluição atmosférica em algo cotidiano para a maior parte da população mundial. Como reação o poder público tende a, pelo menos, iniciar programas de monitoramento da qualidade do ar nos principais centros urbanos. Como ocorre atualmente no Brasil, onde os estados, principalmente, do sul e do sudeste contam com redes de monitoramento da qualidade do ar instaladas, que não são integradas entre os estados e, geralmente, carecem de investimentos em manutenção, não operando, portanto, de forma satisfatória.

Porto Alegre tem uma população de aproximadamente 1,41 milhões de habitantes e está inserida numa região metropolitana que abrange 32 municípios, totalizando, aproximadamente, 3,98 milhões de pessoas (IBGE, 2010). A elevada industrialização desta região faz com que ela tenha o quarto maior produto interno bruto (PIB) do Brasil (World Gazetteer, 2010). Ainda, Porto Alegre apresenta 50,4 veículos para cada 100 habitantes (DETRAN-RS, 2011).

Estiveram em operação de forma contínua em Porto Alegre, nos dois últimos anos, três estações de monitoramento da qualidade do ar. Duas da Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), monitorando os parâmetros partículas inaláveis e dióxido de enxofre e

uma da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMAM), monitorando o parâmetro partículas inaláveis.

As partículas inaláveis representam uma fração específica, de acordo com o tamanho, do material particulado ou das partículas em suspensão no ar. Sua concentração em determinado local será o resultado de interações entre as diferentes fontes de emissão, os fatores meteorológicos e as características topográficas regionais. Seu efeito no receptor em estudo dependerá, ainda, da variada composição química que esse poluente apresenta, pois a composição também é resultado das mesmas interações, citadas anteriormente.

O objetivo deste trabalho é analisar a variabilidade temporal e espacial das concentrações de partículas inaláveis na zona urbana de Porto Alegre, a partir dos dados obtidos pela SMAM e pela FEPAM no período de janeiro de 2009 a agosto de 2011, nas três estações de monitoramento do ar em operação. Isso, de forma que seja possível apontar as mais prováveis causas da variabilidade apresentada.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Composição e Dinâmica da Atmosfera

A atmosfera pode ser comparada a um grande reator em que espécies são continuamente introduzidas e removidas numa vasta série de escalas espaciais e temporais (Seinfeld e Pandis, 2006). Aproximadamente 99% de sua massa está contida dentro da altitude de 30 km, embora o limite de altura do que se considera como atmosfera possa chegar a 9.600 km.

As variações no perfil de temperaturas com a altitude são a base para divisão da atmosfera em cinco camadas; troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera. De uma maneira mais geral, a atmosfera pode ser dividida em alta atmosfera e em baixa atmosfera, que se estende até a altitude de 50 km (limite superior da estratosfera). Os fenômenos abordados neste trabalho ocorrem, predominantemente, na baixa atmosfera.

A troposfera (que se estende até altitudes próximas a 12 km) apresenta composição média molar aproximada de 78% de N₂, 21% de O₂ e 1% de Ar. A concentração de vapor d'água apresenta grande variabilidade, chegando a até 3%. Estão ainda presentes os elementos traços que tem um importante papel no balanço radiativo da Terra e nas propriedades químicas da atmosfera, a abundância desses elementos mudaram de forma rápida e considerável nos últimos dois séculos (Seinfeld e Pandis, 2006).

A condição da atmosfera em um determinado momento e local é denominada tempo, inclui ventos, precipitação, temperatura, pressão, nebulosidade e umidade relativa. O clima de uma região, por sua vez, é a condição da atmosfera durante muitos anos, descrito pelas médias dos mesmos parâmetros usados para o tempo. Dados coletados em períodos de 30 anos são usados para definir as condições normais (distribuição de dados dentro de uma faixa de incidência habitual) de referência do clima, portanto as normais climatológicas utilizadas atualmente são do período entre 1961 e 1990.

O clima é produzido pela interação entre as correntes oceânicas e a circulação na baixa atmosfera. Os processos de troca de energia e umidade entre eles determinam o comportamento do clima, e alterações desses processos podem afetar o clima regional e global (Oliveira, 1999). Os fenômenos El Niño e La Niña são exemplos de alterações no sistema oceano-atmosfera, ocorridas na região tropical do Pacífico, que trazem consequências ao tempo em todo planeta, influenciando, assim, no clima.

Porto Alegre apresenta em seu mês mais quente temperatura média superior a 22°C e, no seu mês mais frio, temperatura média inferior a 18°C. Apresenta, também, precipitação mensal média mínima superior a 30 mm, ou seja, as chuvas são bem distribuídas ao longo dos meses. Portanto esse município, localizado na latitude 30° S e a 100 km do Oceano Atlântico, é classificado, segundo W. Köppen, como sendo subtropical úmido ou Cfa, pela escala de Köppen.

2.2. Poluição Atmosférica

A poluição atmosférica pode ser definida como a presença de substâncias emitidas por atividades antropogênicas em concentrações suficientemente altas, acima de seus níveis normais no ambiente, de maneira a causar efeitos mensuráveis aos seres vivos ou materiais (Seinfeld e Pandis, 2006). De modo a determinar a poluição atmosférica são estabelecidos padrões de qualidade do ar, com base na concentração máxima que certas substâncias podem atingir sem causar os efeitos indesejados.

No Brasil os padrões de qualidade do ar foram estipulados, segundo a Resolução 03 de 1990 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), para os seguintes parâmetros: Partículas Totais em Suspensão, Fumaça, Partículas Inaláveis (PM10), Dióxido de Enxofre, Monóxido de Carbono, Ozônio e Dióxido de Nitrogênio. Para o PM10, poluente de interesse neste trabalho, essa Resolução estabelece, como valores máximos desejáveis, dois padrões: concentração média aritmética anual de 50 microgramas por metro cúbico de ar e, também, concentração média de vinte e quatro horas de 150µg/m³, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

A Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), com objetivo de proporcionar à população o entendimento sobre a qualidade do ar local, utiliza o Índice de Qualidade do Ar (IQAr). Esse índice transforma as concentrações medidas dos diversos poluentes em um único valor adimensional possibilitando a comparação com os limites legais, através de uma função linear segmentada, na qual os pontos de inflexão representam os padrões nacionais de qualidade do ar e os critérios para episódios agudos da poluição do ar, estabelecidos conforme a Resolução CONAMA 03/90. A Tabela 2.1 exemplifica o IQAr para o parâmetro PM10.

No plano internacional outros parâmetros de qualidade do ar somam-se aos presentes na Resolução CONAMA 03/90, como, por exemplo, o PM2,5, ou Partículas Inaláveis Finas. É interessante ressaltar as diferenças existentes entre os padrões, a Organização Mundial da Saúde (OMS), por exemplo, estabelece como padrão para o PM10 uma média aritmética anual de 20µg/m³, já a média em 24h é de 50µg/m³, que não pode ser excedida mais de uma vez ao ano. Enquanto países do bloco europeu seguem os padrões da OMS; os EUA utilizam, para o PM10, os mesmos padrões que o Brasil.

Tabela 2.1. IQAr utilizado pela FEPAM para o PM10.

Qualidade	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Boa	0-50
Regular	51-150
Inadequada	151-250
Má	251-420
Péssima	421-500
Crítica	>500

2.3. Material Particulado e Partículas Inaláveis

O material particulado consiste em partículas com diâmetros aerodinâmicos na faixa de algumas dezenas de angstroms a centenas de micrometros. O tamanho da partícula afeta tanto o seu tempo de permanência na atmosfera como as suas propriedades físicas e químicas (Seinfeld e Pandis, 2006). Portanto o material particulado é classificado em função de sua distribuição de tamanhos.

No estudo e avaliação da qualidade do ar as partículas com diâmetros menores que $2,5\mu\text{m}$ (PM_{2,5}) e menores que $10\mu\text{m}$ (PM₁₀) estão recebendo maior atenção, como pode ser demonstrado por pesquisas realizadas por exemplo em Porto Alegre, por Braga et al. (2005) e Brum (2010), como também, mais recentemente, em outros países por Yudanur et al. (2011) e Juneng et al. (2011). O maior foco nessas classes de partículas está diretamente ligado aos efeitos adversos que elas causam à saúde humana.

Segundo a OMS essas partículas podem atingir as vias respiratórias transportando os gases e os elementos diversos adsorvidos em sua superfície até as porções mais distantes das vias aéreas, prejudicando as trocas gasosas nos pulmões e quanto menores forem as partículas, mais perigosas à saúde elas serão. Segundo Pope et al. (1995) os efeitos relacionados à saúde com o aumento da concentração de PM₁₀ a níveis comuns de poluição, tendo como base as grandes cidades dos EUA e do Canadá, são, entre outros: o aumento do número de hospitalizações por doenças cardiopulmonares, o aumento da morbidez respiratória medido pelo aumento do absentismo no trabalho e na escola e o aumento na mortalidade por doenças cardiopulmonares. Apesar do PM_{2,5} ser mais nocivo à saúde quando comparado ao PM₁₀, o presente trabalho estudará este último, pois consta na Resolução CONAMA 03/1990 e, portanto, é o mais utilizado no monitoramento da qualidade do ar pelos órgãos ambientais brasileiros.

Além dos efeitos causados à saúde humana pelo material particulado na atmosfera, vale ressaltar, ainda, a interferência desses na vegetação e no clima. As partículas influenciam o clima de forma direta pela absorção e reflexão da radiação solar e, também, de forma indireta por atuarem como núcleos de condensação na formação de nuvens. A ação direta

pode resultar no aquecimento ou no resfriamento de determinado local, dependendo da abundância das partículas, de sua distribuição de tamanhos, de suas propriedades óticas e do ângulo de incidência dos raios solares. A ação indireta das partículas no clima pode levar a formação de nuvens com maior concentração de gotas com menores diâmetros, o que resulta em nuvens com maior albedo (fração de radiação solar refletida pela superfície das nuvens, nesse caso) e, portanto, pode causar o resfriamento em determinados locais (Seinfeld e Pandis, 2006).

Os danos à vegetação podem ser exemplificados pelo uso de determinadas espécies vegetais como bioindicadoras da qualidade do ar. A utilização de plantas para avaliação e monitoramento da poluição atmosférica deve-se à extrema sensibilidade dos vegetais e a suas respostas específicas a determinadas substâncias que compõem as partículas (Raya-Rodriguez, 2000).

A composição química do PM₁₀ na Região Metropolitana de Porto Alegre foi estudada por Braga et al. (2005) no período de outubro de 2001 a dezembro de 2002. Nesse estudo foi revelada a presença dos elementos Si, S, Cl, Ca, Fe, Cu com concentrações médias acima de 100ng/m³, chegando a, até, 591,2ng/m³ para o Fe. Já os elementos K, Ti, V, Cr, Mn, Ni e Zn apresentaram concentrações abaixo de 100ng/m³, com o cromo registrando o valor mais baixo, 1,7ng/m³. Em São Paulo, no período de julho a setembro de 1997, a análise das partículas com diâmetros entre 2,5 e 10µm determinou para Si, Ca e Fe concentrações médias acima de 1.000ng/m³, atingindo, até, 2.269ng/m³ para o Si. Já, os elementos S, Zn, K, Ti e Cl registraram concentrações acima 100ng/m³ (Castanho e Artaxo, 2001).

A partir da composição do material particulado é possível identificar suas fontes de emissão. Na Região Metropolitana de Porto Alegre foram identificadas como fontes principais: veículos, plantas de produção de aço, usinas termoeletricas a carvão e sais oriundos do oceano, transportados pelas massas de ar (Braga et al., 2005).

Outras fontes de emissão já tiveram sua influência constatada. A suspensão de poeiras do solo, ligadas ao tráfego de veículos e à construção civil, já foram consideradas responsáveis por até 30% das emissões de material particulado na cidade de São Paulo (Castanho e Artaxo, 2001). Eventos como grandes queimadas e erupções vulcânicas colocam em suspensão grandes quantidades de partículas, que chegam até a estratosfera, e se difundem a distâncias em escala global, podendo precipitar, portanto, em regiões afastadas dessas fontes, contribuindo ainda mais com a poluição atmosférica nessas regiões. Segundo Seinfeld e Pandis (2006) partículas com diâmetros de 2,5µm, ou menores, podem permanecer em suspensão por semanas, percorrendo distâncias na casa dos milhares de quilômetros.

As emissões veiculares são principalmente atribuídas ao processo de combustão dos veículos a diesel, em que a concentração de enxofre nesse combustível contribui para a produção de sulfatos particulados como produtos da combustão, o que não ocorre com a gasolina, por exemplo, cuja combustão contribui em menor parcela na formação de compostos particulados (Ministério do Meio Ambiente, 2011). Porém outra importante forma de contribuição dos veículos como fontes de partículas é através do desgaste dos pneus, principalmente quando os veículos trafegam a velocidades superiores aos 50km/h (Kupiainen e Pirjola, 2011).

2.4. Monitoramento do Material Particulado

Diferentes métodos de amostragem e determinação da concentração de partículas são utilizados seguindo normas de determinação de poluentes no ar ambiente, como as da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (US EPA), por exemplo. Para o PM10, no estado do Rio Grande do Sul, são utilizados, tanto pela FEPAM como pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMAM), basicamente, dois tipos de equipamentos: analisadores que utilizam o método de medida por atenuação de radiação beta e amostradores de grandes volumes.

O funcionamento do analisador por atenuação de radiação beta, utilizado para obtenção dos resultados deste trabalho, é descrito a seguir: pela cabeça de entrada, localizada a, aproximadamente, 3m do solo (conforme recomendado pela US EPA para monitoramento da qualidade do ar urbano), escoam 2,3m³/h de ar ambiente. A cabeça, representada na Figura 2.1, consiste num mecanismo de segregação das partículas por tamanho, em que o ar é puxado na entrada e desviado para bocais de aceleração na unidade de impacto (composta por placas). Devido a seu maior *momentum*, partículas maiores que 10µm impactam nas placas e ficam retidas na câmara de impacto. A fração das partículas menores passa para agora se depositar em um filtro (presente no módulo de análise) com 47mm de diâmetro, que pode ser de celulose, fibra de vidro ou de teflon.

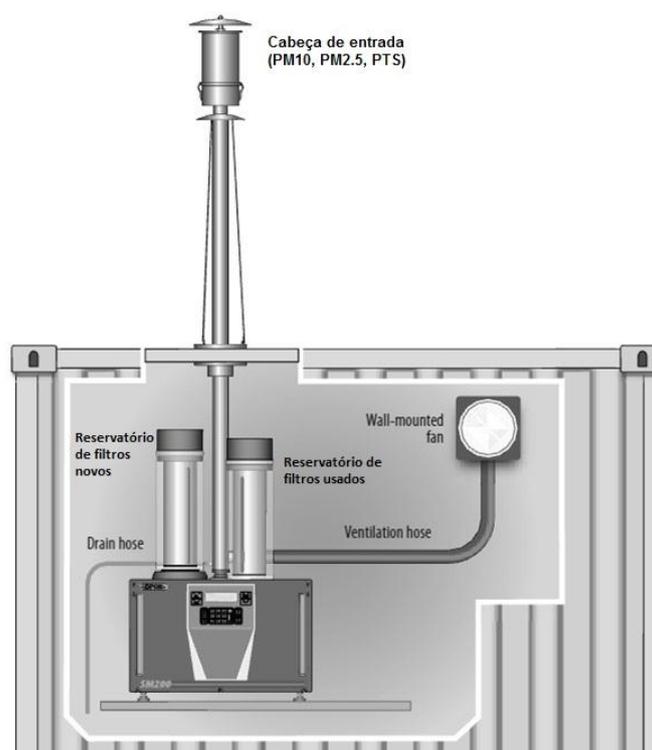


Figura 2.1. Analisador por atenuação de radiação beta (adaptação de Opsis, 2007).

Radiação do tipo beta, com atividade de 9,9mBq, é emitida de uma fonte contendo ¹⁴C, passando pelas partículas depositadas na superfície do filtro para, depois, atingir um detector, que consiste num contador Geiger, conforme ilustrado na Figura 2.2. Cada filtro permanece na posição de medida por 24h. Uma câmara de compensação recebe uma porção de radiação beta com a mesma intensidade que seria transmitida se o filtro estivesse limpo (*I*₀), essa

radiação é a usada como referência. A massa de PM10 (X_m) medida obedece, portanto, a seguinte relação:

$$X_m \propto \ln \frac{I_0}{I} \quad (2.1)$$

em que I é a intensidade da radiação após passar pelas partículas depositadas na superfície do filtro.

Pela medida da massa acumulada no filtro e do fluxo volumétrico de ar pelo instrumento, o analisador pode calcular a concentração mássica de partículas, menores que $10\mu\text{m}$, presentes no ar ambiente.

O instrumento também oferece a opção de determinação horária da concentração de PM10, representada pela sigla RTPM (*Real Time Particle Measurements*). No RTPM um sistema de contagem de partículas, por laser de diodo, é colocado antes do filtro de amostragem. Os resultados obtidos nessa contagem são calibrados com os obtidos pela atenuação da radiação beta, o que pode acarretar em diferenças entre a média diária obtida pela atenuação da radiação beta e a obtida a partir do cálculo das concentrações registradas no RTPM em 24h. O limite de detecção do equipamento é de $0,5\mu\text{g}/\text{m}^3$.

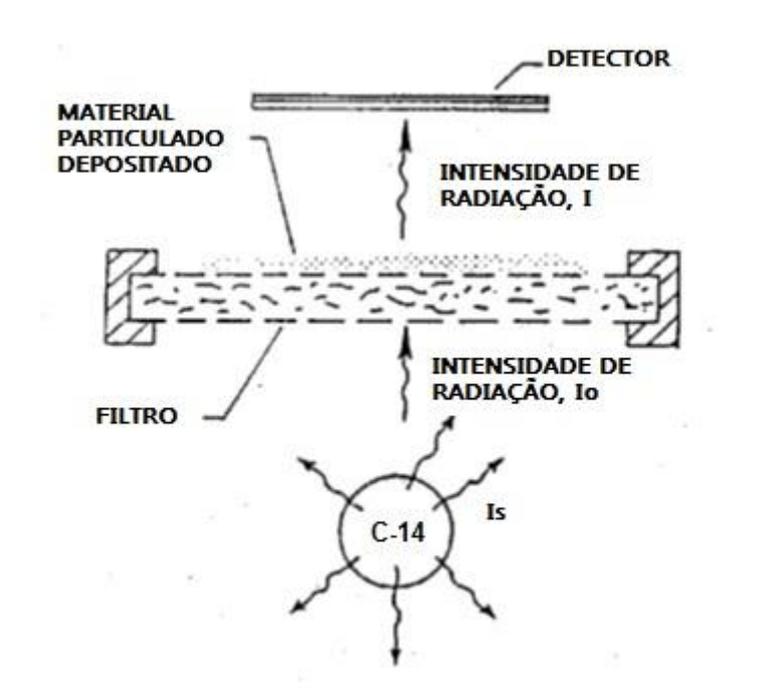


Figura 2.2. Determinação da massa de PM10 por atenuação de radiação beta (adaptação de US EPA, 1999).

Os amostradores de grandes volumes (HV) trabalham com uma vazão de, aproximadamente, $67,8\text{m}^3/\text{h}$. Eles apresentam na cabeça, de forma semelhante ao equipamento descrito anteriormente, um conjunto de bocais que aceleram o ar de coleta para dentro de uma câmara de impactação (Figura 2.3), onde partículas maiores que $10\mu\text{m}$ ficam

retidas numa camada oleosa. A fração de ar com partículas menores que $10\mu\text{m}$ é carregada para fora da câmara e dirigida para um filtro de coleta (fibra de vidro ou quartzo), onde ficam retidas. O volume de ar amostrado é determinado no indicador de taxa de escoamento, já o filtro, após 24h, é retirado e levado para um laboratório, onde se determinará a massa de partículas retidas. Logo, com o volume de ar e a massa de partículas amostradas em 24h, calcula-se a concentração de PM10.

Os HV apresentam altura de aproximadamente 1,6m e por necessitarem procedimentos manuais para troca de filtros e calibração, são geralmente instalados no nível do solo. Ou seja, enquanto os analisadores com fonte beta, automáticos, captam ar na altura de 3m, os HV captam o ar ambiente na altura de 1,6m em relação ao solo, em uma altura menor que a do escapamento de ônibus urbanos, por exemplo.

Para o efetivo monitoramento do parâmetro PM10 os seguintes fatores devem ser determinados, segundo a US EPA: as mais altas concentrações esperadas na área de interesse, as concentrações representativas nas áreas de alta densidade populacional e os níveis gerais de concentração de fundo. Ou seja, isso exige uma rede integrada de monitoramento.

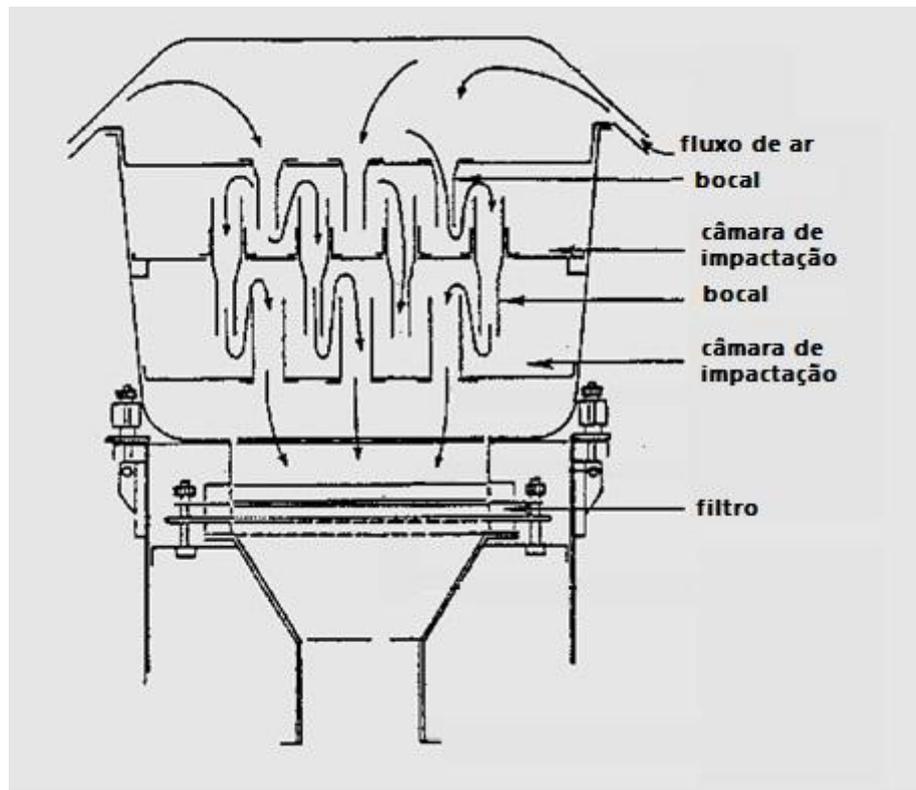


Figura 2.3. Entrada de ar ambiente nos amostradores de grandes volumes para monitoramento de PM10 (adaptação de US EPA, 1999).

Fontoura (2007) dimensionou para o município de Porto Alegre uma rede de monitoramento da qualidade do ar com quatro estações em zonas de alta intensidade de tráfego do município (todas nas regiões centro e norte), uma estação na região de dispersão dos poluentes, segundo a direção predominante dos ventos, que seria em uma das ilhas do delta do Jacuí e a outra como “ponto branco” na reserva biológica do Lami. No presente

trabalho as três estações de onde foram obtidos os dados estão em regiões de alta intensidade de tráfego.

2.5. Meteorologia Aplicada na Dispersão de Particulados

Meteorologia é a denominação dada ao estudo da baixa atmosfera. Ela está intimamente conectada com a qualidade do ar, determinando os níveis de concentração dos poluentes emitidos localmente, a formação de poluentes secundários e o transporte para outras áreas (Seinfeld e Pandis, 2006).

A parte mais baixa da troposfera, a Camada Limite Planetária (CLP), recebe a maior parte das emissões de particulados. A intensidade de turbulência na CLP determinará se o poluente se dispersará rapidamente ou se ficará concentrado num volume relativamente pequeno causando, nesse último caso, um episódio de poluição do ar. A variação de temperatura com a altitude e a velocidade do vento são fatores sempre presentes na determinação das características da CLP.

Considerando a atmosfera no estado de equilíbrio (atmosfera neutra) e uma parcela adiabática de ar seco, que se move verticalmente e em equilíbrio com a vizinhança, obtém-se um gradiente adiabático para as temperaturas em relação à altitude, como descrito a seguir:

$$\Gamma = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{\hat{c}_{p,ar}} \quad (2.2)$$

em que z representa a altitude, g a aceleração da gravidade e $\hat{c}_{p,ar}$ a capacidade calorífica do ar a pressão constante.

Considerando a presença de vapor de água na parcela de ar, tem-se:

$$\Gamma_s = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{\hat{c}_{p,ar} + \Delta H_v \frac{dw}{dT}} \quad (2.3)$$

em que ΔH_v é a entalpia de vaporização da água e w a concentração de vapor de água. Considerando uma parcela de ar saturado que sobe, a concentração de vapor de água diminuirá por condensação, logo (dw/dT) será negativo, ou seja, $\Gamma_s < \Gamma$.

Porém, a influência do aquecimento da superfície e de fenômenos de larga escala provoca, geralmente, uma não neutralidade na atmosfera, resultando num gradiente diferente do adiabático. Assumindo uma parcela de ar adiabático subindo nessa atmosfera não adiabática, com o gradiente representado por Λ , pode-se classificar a estabilidade da atmosfera a partir das seguintes condições:

- 1) $\Lambda > \Gamma$: *atmosfera instável*
- 2) $\Gamma > \Lambda > \Gamma_s$: *atmosfera neutra*
- 3) $\Gamma_s > \Lambda$: *atmosfera estável*

A atmosfera instável é caracterizada por fortes correntes de ar ascendentes e descendentes, resultando numa mais rápida dispersão das partículas emitidas. Essa condição pode ser resultado tanto do aquecimento do ar próximo à superfície como do resfriamento do ar a maiores altitudes. Já, quando a diferença de temperatura do ar entre a superfície e o topo da CLP for relativamente pequena a atmosfera será estável. Nessa condição a tendência das parcelas de ar em se movimentar verticalmente é baixa, resultando na fraca dispersão do poluente emitido.

Se a temperatura aumenta com a altitude, a atmosfera será menos densa em partes mais altas, o que evita a descida de parcelas de ar, tornando a atmosfera muito estável. Esse fenômeno recebe o nome de inversão térmica. Durante a noite, principalmente quando há baixa nebulosidade e ventos fracos (inferiores a 1,5m/s), o resfriamento radiativo da superfície pode levar a formação de uma camada de ar na superfície com temperatura menor que a camada de ar logo acima. Isso resulta em inversão térmica próxima a superfície (a aproximadamente 200m), denominada inversão térmica de superfície (ou radiação).

O fato da inversão térmica de superfície persistir e se intensificar no período noturno permite a gradativa acumulação do material particulado na atmosfera, principalmente durante o inverno, quando as emissões veiculares são mais elevadas no período noturno. Porto Alegre registra, em média, anualmente 80 dias com ocorrência de inversão térmica de superfície, podendo atingir de 60 a 148 dias (UFRGS, PMPA e INPE, 1998).

As massas de ar são grandes células atmosféricas que possuem propriedades semelhantes em uma extensa área e em diferentes níveis altimétricos. Durante a maior parte do ano, mas principalmente na primavera e no verão, Porto Alegre recebe a influência da Massa Tropical Marítima, caracterizada por ser quente, úmida e instável. Durante o inverno, principalmente, atua a Massa Polar Marítima, precedida por uma área de transição entre as massas de ar, denominada de frente fria (Ferraro e Hasenack, 2001). Essa massa de ar frio é estável, com uma camada de inversão térmica bem definida e ventos fracos. Essas características geram, portanto, estagnação atmosférica, levando a ocorrência de picos de concentração de poluentes (Brum, 2010).

O monitoramento da qualidade do ar e, portanto, do material particulado deve ser acompanhado pelo monitoramento das condições meteorológicas, pois estas influenciam diretamente no comportamento dos poluentes logo após sua emissão. Os parâmetros meteorológicos utilizados e seus respectivos métodos de determinação são listados na Tabela 2.2.

2.6. Análise de Variância de Um Fator

Métodos estatísticos não provam que um fator exerce um efeito particular, eles fornecem, somente, informações sobre a confiabilidade e validade dos resultados. Métodos estatísticos, portanto, quando somados ao entendimento do processo envolvido, acrescentam objetividade à interpretação dos resultados (Montgomery, 2009).

Métodos gráficos auxiliam na análise dos dados de um experimento, apresentando informações de forma resumida (Montgomery, 2009). Um dos métodos gráficos que fornece informações sobre a variabilidade de um conjunto de dados é o box plot. Nele pode-se,

também, detectar com precisão a presença de valores *outliers*, pontos extremos registrados (Lima, 2007). A Figura 2.4 mostra a disposição e a forma em que as diferentes informações são representadas nesse tipo de diagrama.

Tabela 2.2. Métodos de determinação de parâmetros meteorológicos (adaptação de US EPA, 2008).

Parâmetro	Método	Unidades	Faixa de Operação	Limite de Detecção	Amostragem Mínima
Temperatura Ambiente	Termógrafo	°C	-20 a 40	0,1	Horária
Umidade Relativa	Psicrômetro	%	0 a 100	0,5	Horária
Pressão Barométrica	Barômetro	hPa	800 a 1100	0,1	Horária
Velocidade do Vento	Anemômetro	m/s	0,5 a 50	0,1	Horária
Direção do Vento	Anemômetro	Graus	0 a 360	1	Horária
Radiação Solar	Pinanômetro	kJ/m ²	0 a 1200	1	Horária
Precipitação	Pluviômetro	mm/h	0 a 30	0,25	Horária

Os limites inferior (LI) e superior (LS), representados na Figura 2.4, representam os valores mínimos e máximos, respectivamente, do conjunto de dados sem considerar os valores extremos. Estes limites são, a seguir, definidos:

$$LI = Q_1 - 1,5 * (Q_3 - Q_1) \quad (2.4)$$

$$LS = Q_3 + 1,5 * (Q_3 - Q_1) \quad (2.5)$$

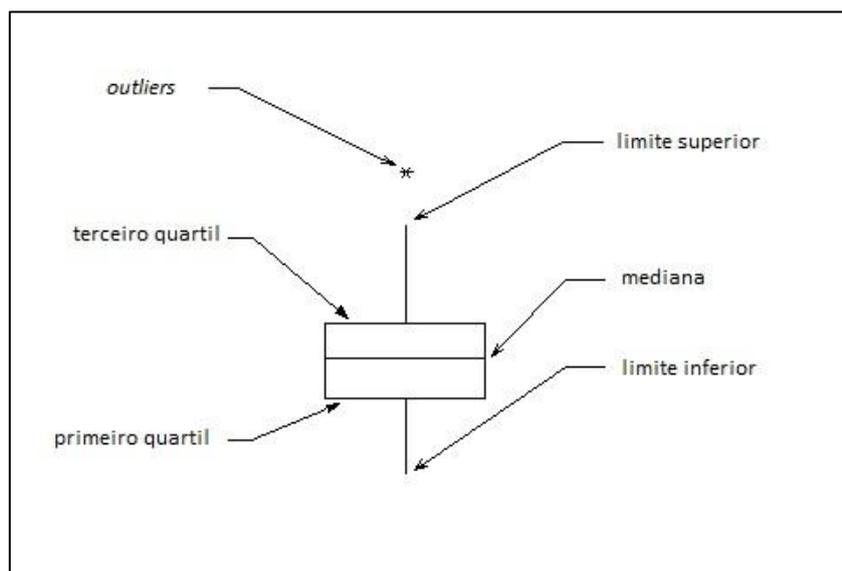


Figura 2.4. Parâmetros estatísticos apresentados nos box plots.

Quartis são valores que dividem um conjunto ordenado de dados em quatro partes iguais e, assim, cada parte representa 1/4 da amostra ou população. Portanto o primeiro quartil (Q_1) é o valor que está na posição que representa 25% de todos os dados, organizados em ordem crescente. O valor que está na posição que representa 75% de todos os dados é o terceiro quartil (Q_3). Mediana é o nome dado ao segundo quartil. Os pontos situados acima do limite superior ou abaixo do limite inferior são considerados *outliers*.

Devido à variabilidade inerente de um processo, as medidas individuais são diferentes, mas em grupo elas tendem a formar um padrão, que pode ser descrito por uma distribuição de probabilidade. Muitos testes estatísticos partem do princípio que os dados amostrados apresentam uma distribuição normal de probabilidade.

Existem métodos específicos que podem testar se um conjunto de dados segue uma distribuição normal, um deles é o teste de Anderson-Darling. Nesse teste, considera-se normal a distribuição que apresentar o valor P maior do que 0,05. O valor P é definido como o menor nível de significância que levará a rejeição da hipótese nula.

Caso a distribuição não seja normal, pode-se partir para uma transformação de dados a partir do método de Box Cox, por exemplo. Esse método propõe uma transformação exponencial da variável de resposta de x para $x(\lambda)$, de modo que os dados transformados apresentem uma distribuição normal. Embora essa transformação altere a escala dos dados, ela não afeta métodos estatísticos como a análise de variância (ANOVA), por exemplo.

A ANOVA é um método que avalia a significância de um ou mais fatores na variável de resposta, testando a igualdade de médias (Montgomery, 2009). Para validar a ANOVA as seguintes suposições devem ser satisfeitas: distribuição normal dos dados, homogeneidade das variâncias em cada tratamento, aditividade dos efeitos e independência estatística dos valores observados.

Considerando um experimento que estuda o efeito de um fator, a partir de n observações, divididas em a grupos, utiliza-se o seguinte modelo para descrever os dados (y):

$$Y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, a \end{cases} \quad (2.6)$$

em que μ é a média geral, τ_j é o efeito do grupo j e ε_{ij} é um erro aleatório.

A igualdade das médias nos a grupos é testada nas seguintes hipóteses:

$$H_0: \tau_j = 0 \quad (2.7)$$

$$H_1: \tau_j \neq 0 \text{ para pelo menos um } j \quad (2.8)$$

O objetivo é rejeitar H_0 a um nível α de significância. A variabilidade total é decomposta entre componentes, de modo a gerar a Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Tabela para ANOVA de um fator

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F0	Valor P
Entre Grupos	$SQE = n \sum_{j=1}^a (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})^2 - TC$	$a - 1$	$MSE = \frac{SQE}{(a - 1)}$	$F0 = \frac{MSE}{MSR}$	P
Residual	$SQR = SQT - SQE$	$N - a$	$MSR = \frac{SQR}{(N - a)}$		
Total	$SQT = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 - TC$	$N - 1$			

Na Tabela 2.3 o termo $\bar{y}_{.j}$ representa a média das observações no grupo j , enquanto o termo $\bar{y}_{..}$ é a média de todas as observações. O termo N é a soma do número de observações em todos os grupos e TC é representado por:

$$TC = \frac{T_{..}^2}{N} \quad (2.9)$$

em que $T_{..}$ representa a soma de todos valores da amostra.

O termo $F0$ e o valor P representam os testes estatísticos. O $F0$ calculado é comparado com o valor equivalente, aos graus de liberdade e a determinado nível de significância α , na Distribuição de Fisher. Se o valor calculado for maior que o valor tabelado, descarta-se H_0 , ou seja, existem diferenças significativas entre os grupos. O valor P é o menor nível de significância que levará a rejeição da hipótese H_0 , por exemplo, se α for 0,05 e $P < 0,05$ há diferença entre os grupos.

Após calcular a ANOVA, violações nas considerações básicas podem, ainda, ser investigadas por análises gráficas dos resíduos (Montgomery, 2009). Elas consistem na identificação de padrões inadequados nos gráficos de distribuição normal de probabilidades dos resíduos, dos resíduos versus os valores ajustados e dos resíduos na sequência do tempo.

Quando o número de observações for diferente nos grupos, a ANOVA ainda pode ser utilizada, mas com a seguinte alteração:

$$SQE = n \sum_{j=1}^a \left(\frac{y_{.j}^2}{ni} - \frac{y_{..}^2}{N} \right) - TC \quad (2.10)$$

A ANOVA indica, portanto, se há ou não diferença significativa entre os grupos, porém não informa entre quais grupos existe essa diferença. O teste de Tukey, segundo Montgomery (2009), declara duas médias significantemente diferentes se:

$$\bar{y}_i - \bar{y}_j \geq T\alpha \quad (2.11)$$

$$T\alpha = \frac{q\alpha(a, f)}{\sqrt{2}} \sqrt{[SQE(\frac{1}{n_j} + \frac{1}{n_i})]} \quad (2.12)$$

em que $q\alpha$ é a amplitude studentizada, com valores tabelados. Os índices i e j representam, agora, dois diferentes grupos na comparação. Logo, a partir desse teste, os grupos podem ser comparados conforme a semelhança, ou não, de suas médias.

3. Materiais e Métodos

3.1. Coleta e Obtenção dos Dados

Concentrações de PM10 foram medidas por um analisador de material particulado por atenuação de radiação beta, modelo SM200 marca Opsi, na estação Centro de monitoramento da qualidade do ar da Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Porto Alegre (SMAM). Essa estação está localizada na esquina das avenidas Borges de Medeiros e Senador Salgado Filho, Centro Histórico de Porto Alegre.

Na estação Centro foram coletadas, de janeiro de 2009 a agosto de 2011, concentrações médias diárias e médias horárias de PM10. No total se analisou as médias de 693 dias. Com relação às médias horárias, estudaram-se 189 dias, pois foram nesses, somente, que a média em 24h, calculada a partir dos valores horários, não se diferenciou em mais de 20% da média diária medida pela atenuação da radiação beta.

As concentrações de PM10 medidas nas estações CEASA e 8° Disme foram obtidas em boletins mensais divulgados pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM). Nessas estações, são utilizados amostradores de grandes volumes nas medições, que são feitas a cada seis dias. Portanto somente em 50 dias havia valores para as três estações serem comparadas.

A estação CEASA está localizada dentro do centro distribuidor de hortigranjeiros homônimo, na zona norte do município, próxima às duas principais rodovias de acesso a Porto Alegre, BR-290 e BR-116, e também próxima ao aeroporto internacional Salgado Filho. Já, a estação 8° Disme está localizada no interior do Jardim Botânico, próxima a uma das principais avenidas de Porto Alegre, a Av. Ipiranga.

Os dados meteorológicos, por sua vez, provêm de três fontes, com cada uma fornecendo diferentes parâmetros, conforme a Tabela 3.1. As localizações das estações meteorológicas e de monitoramento da qualidade do ar, que forneceram dados a este trabalho, estão ilustradas na Figura 3.1.

Tabela 3.1. Origem e caracterização dos dados meteorológicos.

Fonte	Localização	Variáveis	Frequência
8° Distrito de Meteorologia	Jardim Botânico	Temperatura, Umidade Relativa, Radiação Solar	Diária
Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica	Aeroporto Salgado Filho	Pressão Atmosférica e Velocidade e Direção dos Ventos	Diária
Metroclima	Palácio Piratini	Volume Acumulado de Chuva	Diária

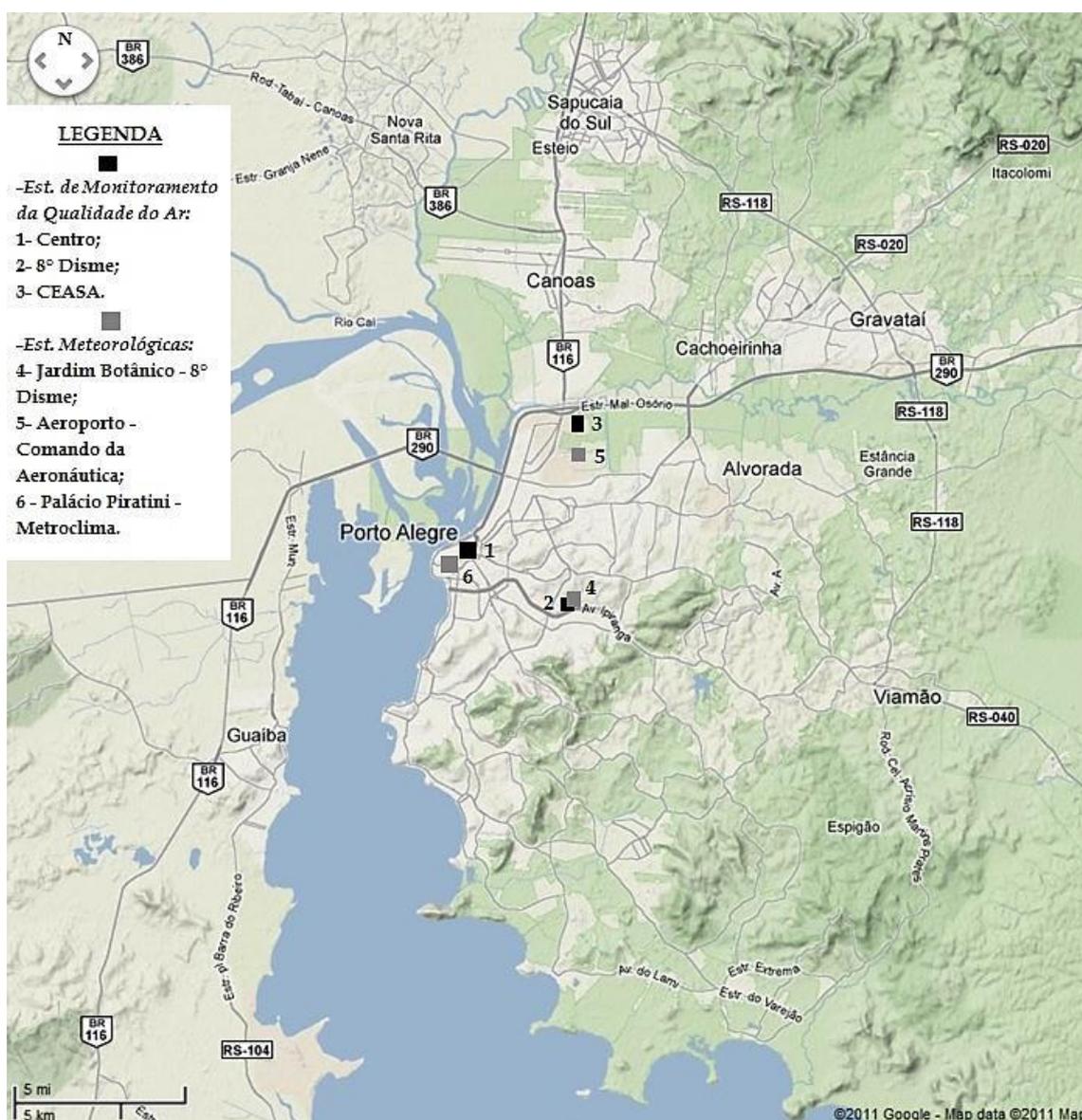


Figura 3.1. Localização das estações (adaptação de Google Maps, 2011).

3.2. Tratamento Estatístico

Os dados de concentração de PM10 foram organizados de maneira a permitir a análise da variabilidade nos valores obtidos para este parâmetro. Os fatores estudados e considerados responsáveis pelas variações nas concentrações obtidas (variável de resposta) foram: localização das estações, hora local, dia da semana, mês e ano.

Para cada fator realizou-se uma ANOVA, que, portanto, considerou somente o efeito de um fator nas concentrações de PM10. A Tabela 3.2 apresenta as condições existentes para realização da ANOVA. Para o fator mês o número de grupos não foi igual a 12, pois nos meses de março, novembro e dezembro menos de 50% dos dias apresentaram valores válidos, considerados os três anos. Com este critério buscou-se manter uma representatividade dos dados durante a análise. Em relação ao fator ano, comparou-se somente o período de janeiro a agosto entre os anos de 2009, 2010 e 2011, com a intenção de aproximar a quantidade de observações entre os grupos. Vale lembrar que os últimos dados obtidos em 2011 são referentes a agosto.

Tabela 3.2. Organização dos dados para o cálculo da ANOVA.

Variável de Resposta	Fator	Nº de Grupos	Nº de Observações
Concentração de PM10	Localização das Estações	3	50
Concentração de PM10	Intervalo Horário	23	189
Concentração de PM10	Dia da Semana	7	Diferente em cada dia, valores entre 94 e 104
Concentração de PM10	Mês	9	Diferente em cada mês, valores entre 48 e 77
Concentração de PM10	Ano	3	Diferente em cada ano, valores entre 148 e 174

As concentrações, entretanto, antes de terem suas médias comparadas em relação a cada fator pela ANOVA, deveriam apresentar distribuições normais de probabilidade, o que, pelo teste de Anderson-Darling, comprovou-se não ocorrer em nenhum caso. Portanto foi necessária uma transformação Box-Cox de variáveis. A partir deste procedimento as distribuições de probabilidade tornaram-se normais e foi possível seguir para a ANOVA.

Após a geração da tabela de resultados, é necessário checar se o modelo criado foi adequado, principalmente, quando o número de observações difere em cada grupo, pois quando ele é igual, a ANOVA é mais robusta a pequenas diferenças entre as variâncias nos grupos (Montgomery, 2009). A partir do exame dos resíduos, realizou-se graficamente a avaliação dos modelos. A interpretação dos resultados fornecidos pela ANOVA deu-se pelo método de Tukey. Já para a visualização gráfica dos resultados utilizaram-se diagramas box plot. O nível de significância utilizado nos testes foi de 5%.

O software utilizado para os procedimentos estatísticos descritos acima foi o Minitab.

4. Resultados

As concentrações mássicas de PM10 estiveram dentro do padrão estabelecido pela resolução CONAMA 003/1990 em todos os dias amostrados e nas três estações. Ou seja, nenhuma concentração ultrapassou o valor médio diário de $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ nos anos de 2009, 2010 e 2011 (até o mês de agosto), nem as três médias geométricas anuais (considerando que os tamanhos das amostras das estações CEASA e 8º Disme não são representativos para o cálculo de uma média anual) foram maiores que $50\mu\text{g}/\text{m}^3$. No período a mínima concentração registrada foi de $5,0\mu\text{g}/\text{m}^3$ e a máxima de $120,3\mu\text{g}/\text{m}^3$, ambas na estação Centro, a menor no ano de 2009 e a maior em 2010.

O fato das concentrações de partículas inaláveis alcançarem essa amplitude é explicado pelas características específicas de Porto Alegre, como o clima, a topografia, a localização e as fontes de emissão. Os resultados serão apresentados de forma a relacionar a influências destas características com a variabilidade encontrada nas concentrações de PM10, em que os fatores responsáveis pela variabilidade serão o local de coleta dos dados, o horário, o dia da semana, o mês e o ano. Busca-se, com estes fatores, englobar a dinâmica das alterações meteorológicas e as mudanças cíclicas no fluxo de veículos, em comparações estatísticas que apresentem para cada variável de resposta, apenas um fator.

A influência de cada fator na concentração de PM10 está dividida nas próximas seções deste capítulo. Vale lembrar que os fatores de ordem temporal foram somente estudados para a estação Centro, devido à quantidade de dias amostrados neste local serem de 693 contra 50 dias para as estações CEASA e 8º Disme, representados na Figura 4.1, juntamente com as concentrações registradas na estação Centro nos mesmos dias.

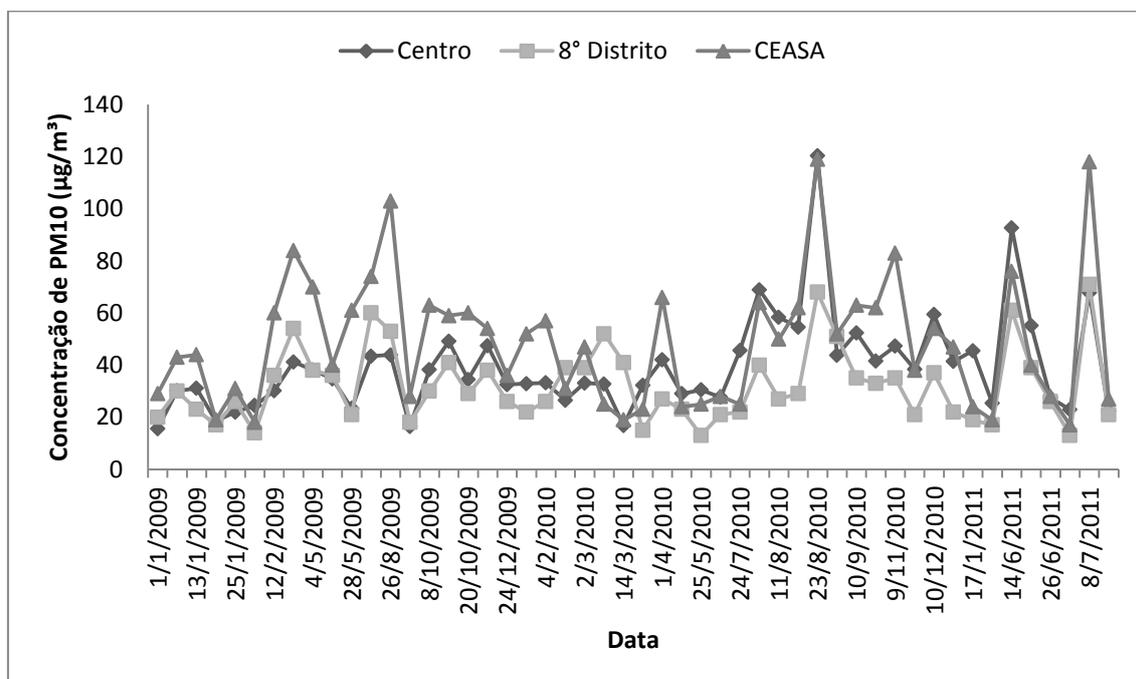


Figura 4.1. Concentrações médias diárias de PM10 utilizadas na análise de variabilidade espacial.

4.1. Variabilidade Espacial

Pela análise de variância entre as amostras chegou-se a um valor de p igual a 0,0005, que é menor que o nível de significância ($\alpha=0,05$), portanto as médias diferem. O teste de Tukey indicou que há diferença significativa entre as médias das estações CEASA e 8° Disme, mas não há diferença significativa entre as médias da CEASA e do Centro. Não há diferença significativa também entre as médias das estações 8° Disme e Centro. Isso pode ser visualizado na Figura 4.2, comparando as variabilidades e as medianas.

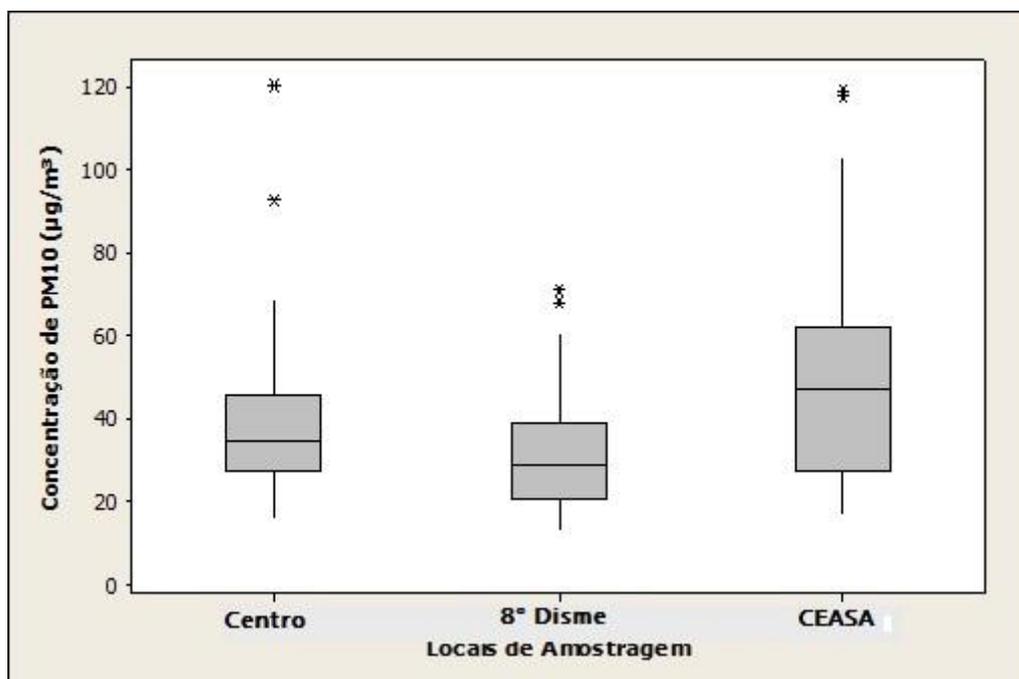


Figura 4.2. Box plot das concentrações médias diárias de PM10 nos três locais de amostragem.

A estação CEASA está localizada na várzea do Rio Gravataí, uma depressão, que permite a acumulação do ar frio noturno, gerador de inversões térmicas de superfície. O fato de estar localizada próxima de rodovias movimentadas, a leste da BR-116 e a sul da BR-290, faz com que a estação receba o poluente oriundo dessas rodovias quando a direção do vento está nos intervalos entre 240 e 360° e entre 0 e 40°. No período de estudo 30,5% dos ventos registrados estavam nesses intervalos de direção.

Outro motivo que contribui para que a estação CEASA apresente a maior concentração média de PM10 é a sua localização em microescala, ou seja, o fato de nos dias de grande movimento chegar a circular pelo local cerca de 30 mil pessoas e mais de 10 mil veículos (Portal CEASA/RS, 2011). Vale ressaltar que a maior parte desses veículos são caminhões de pequeno a médio porte, importantes fontes de PM10.

A estação Centro está localizada entre um terminal de dez linhas de táxi-lotações e o Terminal Salgado Filho-Borges de Medeiros, onde circulam 98 linhas de ônibus (EPTC, 2010). Além disso, o bairro Centro está situado ao longo da trajetória dos ventos predominantes e condutores da poluição que, portanto, converge na direção desse bairro (UFRGS, PMPA e INPE, 1998).

Entretanto algumas características são determinantes para que a estação Centro ocupe a posição intermediária neste comparativo. A Av. Borges de Medeiros, por ser muito edificada, forma um cânion urbano orientando a direção do vento. Nesse local, os ventos de direção sul, ou a própria brisa lacustre, têm sua velocidade aumentada ao escoar pelo cânion, favorecendo a dispersão do material particulado (UFRGS, PMPA e INPE, 1998). Em dias de calmaria, quando a superfície muito rugosa favorece o acúmulo do poluente, o fenômeno da ilha de calor, ocasionado pela vegetação escassa e a alta densidade de edificações, forma uma camada de ar instável.

A estação 8º Disme, por estar dentro do Jardim Botânico, portanto, mais afastada das fontes emissoras de PM10 e também por receber a menor carga de poluente transportada pelos ventos predominantes (ela está mais a sudeste que as outras), apresentou a menor média no comparativo.

Porém, como determinado através do Teste de Tukey, não houve diferença significativa entre as médias da estação 8º Disme e da estação Centro. A menos de um quilômetro a leste desta estação está sendo construído um novo bairro, possível fonte, portanto, de suspensão de partículas do solo. A topografia da região (entre a Crista da Matriz e a Várzea do Dilúvio, ver Figura 3.1) favorece a drenagem do ar frio de modo semelhante ao que ocorre na estação CEASA, contribuindo com a ocorrência de inversões térmicas de superfície.

Os diferentes modelos de analisadores, seus diferentes modos de operação e até mesmo a altura de coleta do ar, apesar de o parâmetro medido ser o mesmo, são fatores que poderiam ser considerados numa comparação de caráter mais quantitativo. Porém, para fins de classificação das três estações e análise da variabilidade nas concentrações de PM10 em diferentes pontos da cidade, estes fatores foram desconsiderados.

4.2. Variabilidade Horária

As médias horárias registraram valores entre $221,8\mu\text{g}/\text{m}^3$, entre 16h e 17h no dia 22 de maio de 2011, e $1,0\mu\text{g}/\text{m}^3$, entre 23h e 24h no dia 05 de abril de 2010. Porém, a ocorrência dos extremos nesses períodos do dia são exceções ao comportamento das concentrações de PM10 durante o dia, representado na Figura 4.3.

A análise de variância seguida pelo método de Tukey indicou uma diferença significativa entre os períodos da tarde e o que compreende o intervalo que vai das 19h às 10h, do próximo dia, que apresentou a maior ocorrência de concentrações mais altas. O período entre 7h e 9h, da manhã, apresentou as maiores médias e variabilidades.

Os motivos para esse comportamento estão ligados ao trânsito e, principalmente, ao aquecimento da superfície durante o dia. No início da manhã a camada limite planetária (CLP) aumenta sua altura devido ao aquecimento solar, ela atinge a maior altura quando a temperatura atinge a máxima diária (Castanho e Artaxo, 2001). Durante a hora do *rush* do fim da tarde, mesmo que as emissões sejam similares às da manhã, as concentrações de PM10 são menores porque elas estão diluídas sob o maior volume da CLP (Seinfeld e Pandis, 2006).

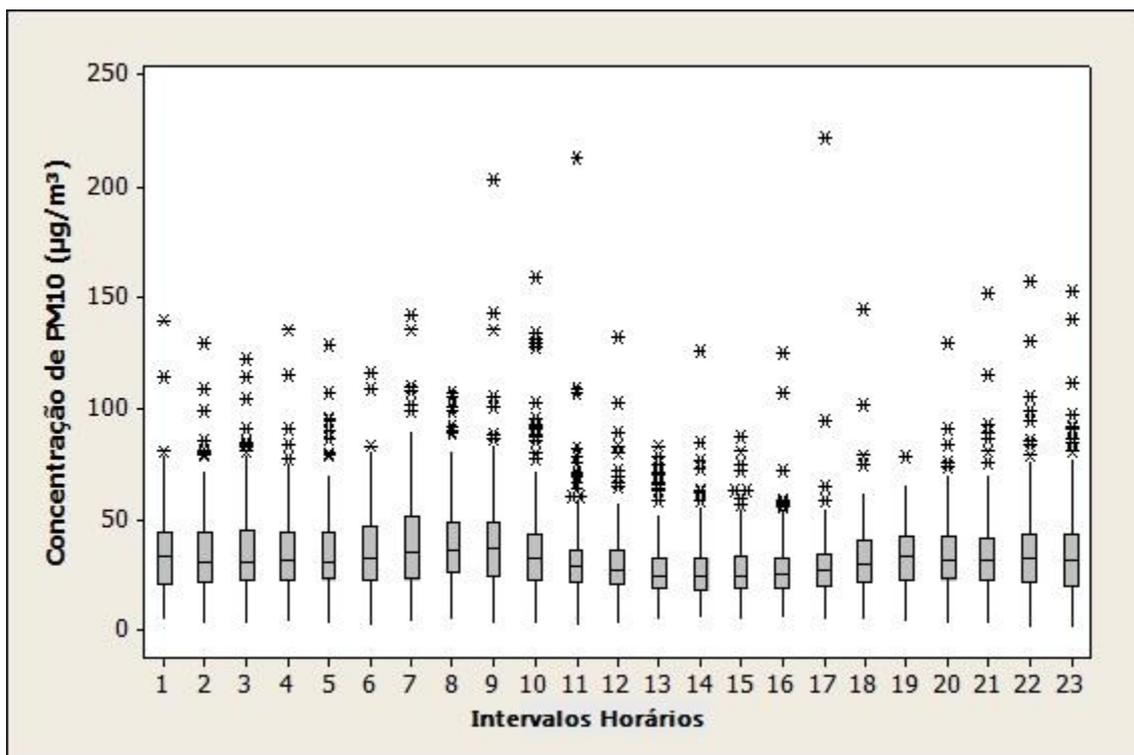


Figura 4.3. Box plot das concentrações médias horárias de PM10 na estação Centro.

A influência da radiação solar e da temperatura na variação das concentrações de material particulado, durante o dia, é clara na Figura 4.4. A diminuição da umidade relativa (UR) acompanha o aumento da temperatura e é outro parâmetro meteorológico que pode ser correlacionado com as concentrações de PM10. A dinâmica da camada limite pode, também, ser observada no perfil médio de velocidades do vento ao longo do dia, em que durante a tarde a velocidade do vento aumenta.

A figura 4.4, apesar de representar bem a influência da radiação solar na queda de concentração do material particulado, mostra um comportamento particular, pois os maiores valores de PM10 ocorrem no fim da manhã e os menores durante a noite. Nesse dia de inverno Porto Alegre estava sob a influência da Massa de Ar Polar Marítima, que propiciou a ocorrência de inversão térmica de superfície. Portanto, o poluente foi se acumulando próximo à superfície durante a manhã e, quando não havia mais a inversão o material particulado aos poucos se dissipou.

Estudos já determinaram correlações entre a concentração de partículas inaláveis e os parâmetros meteorológicos, porém isso varia com o clima e a região de estudo. O exemplo mais claro dessa variação é a direção do vento e sua relação com prováveis fontes fixas de poluentes atmosféricos. Neste trabalho nenhuma correlação, ou regressão linear, do PM10 com os parâmetros meteorológicos foi realizada, principalmente, por causa da distância entre as estações meteorológicas e a estação Centro, considerando as influências da topografia e dos microclimas.

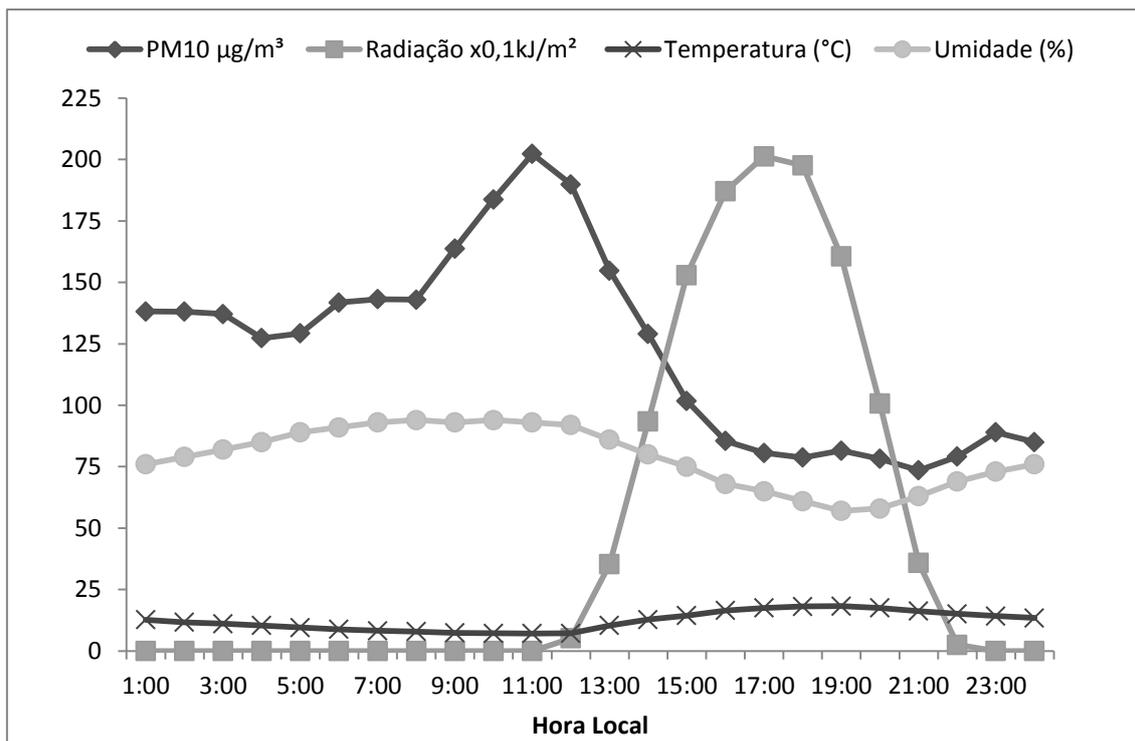


Figura 4.4. Comportamento, na terça-feira dia 14/06/2011, da concentração horária de PM10, na estação Centro, frente às mudanças nos parâmetros meteorológicos em função da hora do dia.

Mas é preciso, ainda, explicar a ocorrência durante a tarde, da maior média horária registrada no dia 22 de maio de 2011, um domingo. Nesse dia, estava-se registrando valores na ordem de $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante o fim da manhã e a partir do meio dia a concentração começou a subir, atingiu o máximo por volta das 17h e voltou para casa dos $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ no intervalo entre 21h e 22h. Esse dia registrou uma temperatura máxima de $26,2^\circ\text{C}$ e uma mínima de 14°C , durante a tarde a UR chegou a 46%, havia baixa nebulosidade, os ventos oscilavam entre as direções noroeste e nordeste (com rajadas de até $6,9\text{m/s}$) e a pressão atmosférica média foi de 1012hPa . Portanto, analisando as condições meteorológicas, não é possível identificar motivos para a alta concentração de PM10 nesse dia e nesse horário.

O parágrafo anterior reforça a ideia de que a estação Centro, assim como outras localizadas muito próximas a vias e em áreas densamente povoadas, está sujeita a registrar concentrações, talvez, com baixa representatividade no ambiente de Porto Alegre ou, até mesmo, com baixa representatividade no bairro. Isso explica a ocorrência dos vários *outliers* representados nos diagramas box plot, principalmente desta seção, mas também das próximas.

4.3. Variabilidade Diária

A variação das concentrações médias diárias em cada dia da semana apresenta a direta relação entre o fluxo de veículos e os valores alcançados de PM10. A Figura 4.5 mostra a variabilidade diária do poluente em função do dia da semana na estação Centro durante todo o período de amostragem, de janeiro de 2009 a agosto de 2011.

A análise estatística indicou diferença significativa entre as quartas-feiras e os dias sábado e domingo. Também houve diferença entre os demais dias úteis (somando-se a eles o sábado) e o dia de domingo. Este agrupamento, calculado pelo método de Tukey, pode ser melhor observado a seguir na Tabela 4.1. Nela, os dias que compartilham entre si as letras A, B ou C não apresentam diferenças significativas entre as suas médias.

Logo o dia com as maiores concentrações de material particulado é quarta-feira e o com as menores concentrações é domingo. Porém, mais uma vez, isso não significa que altas concentrações não ocorram, eventualmente, nos fins de semana, decorrentes de outras fontes de poluição ou de características meteorológicas particulares.

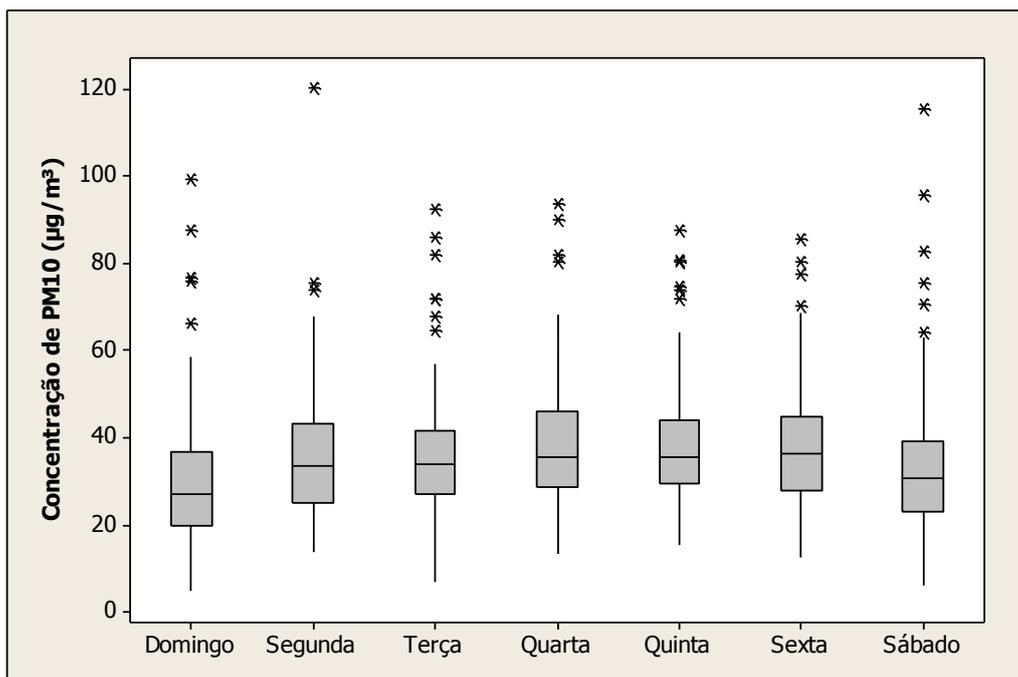


Figura 4.5. Box plot para concentração média diária de PM10 nos diferentes dias da semana, de janeiro de 2009 a agosto de 2011.

Tabela 4.1. Método de Tukey aplicado aos dias da semana.

Dia	Agrupamento		
Domingo	A		
Sábado	A	B	
Terça-Feira		B	C
Segunda-Feira		B	C
Sexta-Feira		B	C
Quinta-Feira		B	C
Quarta-Feira			C

4.4. Variabilidade Mensal

Agora a influência dos meses do ano nas concentrações de material particulado é analisada. A partir da análise estatística podem-se classificar os meses de junho, julho e agosto como os de maiores concentrações e os meses de janeiro, fevereiro, maio e setembro como os

de menores concentrações de PM10. Na Figura 4.6 pode-se, ainda, atribuir ao mês de janeiro a maior ocorrência de valores baixos e ao mês de agosto a maior ocorrência de valores altos.

Os meses de março, novembro e dezembro não foram analisados porque não havia dados suficientes para atingir o critério de representatividade estipulado para esta análise. Lembrando que, por este critério, meses em que menos de 50% das concentrações foram validadas, somando os anos de 2009, 2010 e 2011, são descartados da análise.

Os meses que mostraram as maiores concentrações médias do poluente, em comparação com os meses de verão, têm historicamente (de acordo com as normais climatológicas) maiores volumes acumulados de chuva que, em contrapartida, é o mais efetivo fator para a remoção de partículas da atmosfera (Migliavacca et al., 2004). Entretanto, no inverno, após a passagem da frente fria o tempo volta a estabilizar-se devido ao predomínio da Massa de Ar Polar Marítima. Nesses períodos se evidenciam ventos fracos, que somados às baixas temperaturas, criam condições favoráveis à formação de uma camada de inversão térmica próxima à superfície.

O mês de agosto, em comparação com o mês de julho, apresenta maiores médias de temperatura, insolação e velocidade do vento, porém ele se destaca na Figura 4.6 como o mês mais poluído em relação ao PM10.

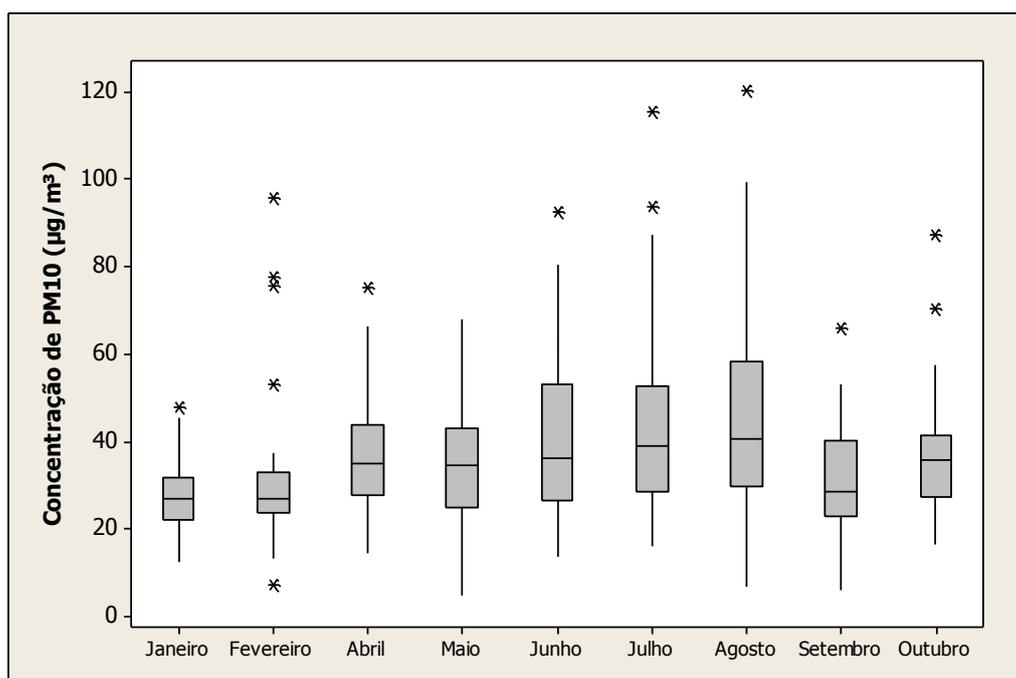


Figura 4.6. Box plot das concentrações médias diárias de PM10, agrupadas nos meses considerados, na estação Centro.

No inverno a perda de intensidade da Massa Polar Marítima pode ocasionar a penetração, pelo noroeste do Rio Grande do Sul, da Massa Tropical Continental, formada no centro de baixa pressão da Depressão do Chaco (Ferraro e Hasenack, 2000), trazendo consigo as características atmosféricas da região onde foi formada. Inclui-se a este fato a maior incidência de queimadas principalmente nas regiões Centro-Oeste do Brasil, norte da

Argentina e, também, no Paraguai e na Bolívia durante o mês de agosto (Figura 4.7). Logo, a massa de ar oriunda dessas regiões transportará as cinzas formadas pelas queimadas. No mês de agosto, segundo o Boletim de Informações Climáticas do CPTEC/INPE de setembro de 2010, o número de focos de incêndio aumentou 200% em comparação com o mês de junho de 2010 e 280% em comparação com agosto de 2009. Como resultado dessas constatações, no dia 24 de agosto de 2010 foi registrada a maior concentração de PM10 do período de estudo, 120,3µg/m³.

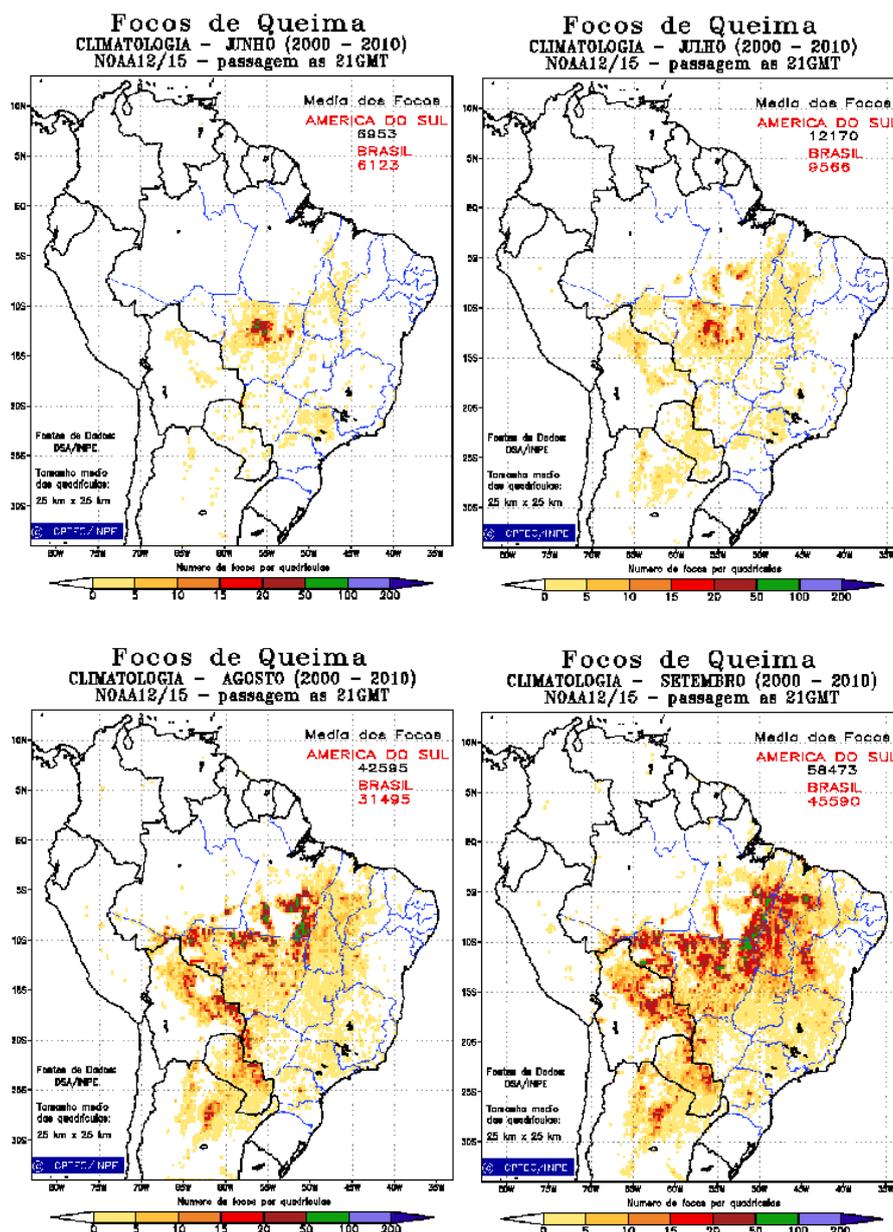


Figura 4.7. Evolução mensal média dos focos de queima de 2000 a 2010 (fonte INPE, 2011).

O mês de setembro, embora registre maior número médio de focos de queimadas que em agosto, apresenta um comportamento em relação às concentrações de particulados, similar aos meses de janeiro e fevereiro. O mês de setembro marca o fim do inverno, ou seja, a frequência e a intensidade das frentes frias já são menores e, para justificar a menor

concentração média de PM10 em relação a outubro, apresenta maior precipitação pluviométrica média mensal.

4.5. Variabilidade Anual

Nessa etapa foi realizada comparação estatística entre os períodos de janeiro a agosto dos anos de 2009, 2010 e 2011, constituída pela análise de variância com um fator de variabilidade (ano). A interpretação da ANOVA pelo método de Tukey agrupou os anos em dois grupos, 2009 e 2010 sem diferença significativa entre eles e 2011, com média significativamente maior que os outros anos. A Figura 4.8 ilustra a evolução das concentrações de PM10 nos anos analisados.

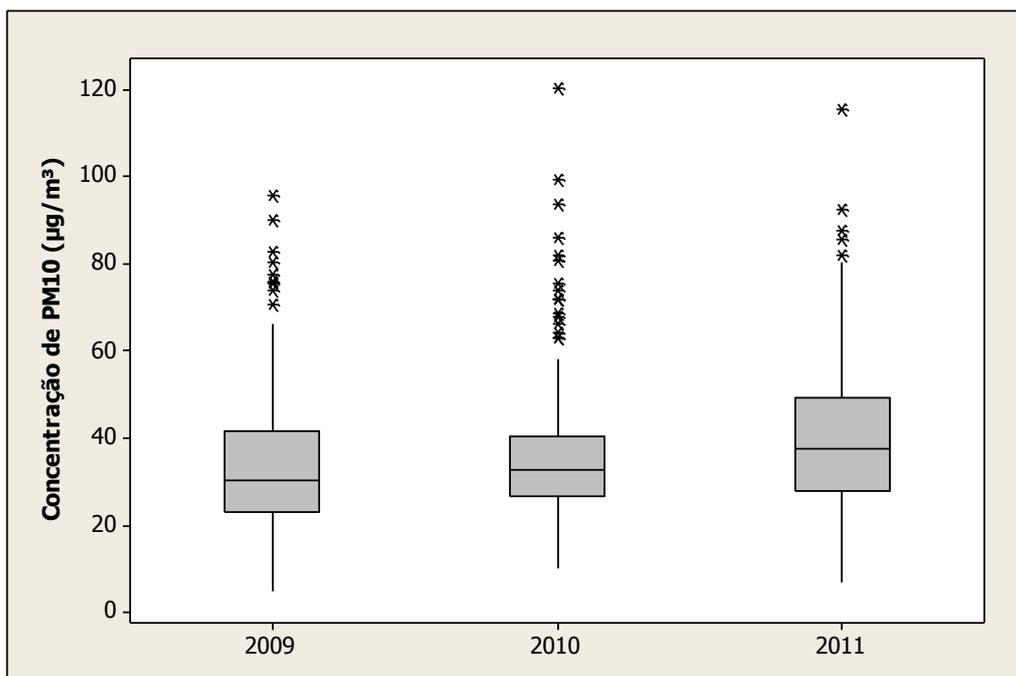


Figura 4.8. Box plot das concentrações médias diárias de PM10 na estação Centro, agrupadas nos três anos de estudo.

Nesses três anos identifica-se um aumento nas concentrações médias mensais de PM10 nos meses de inverno do ano de 2011, com destaque ao mês de junho. Em 2009 o mês de junho apresentou concentração média de $34,3\mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto, em 2011 registrou média de $49,2\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Analisando, nesses anos, o comportamento do clima em escala global, segundo boletins climáticos mensais do 8ºDISME/INMET e do CPPMet/UFPEL, no início do ano de 2009 o fenômeno La Niña apresentava-se com intensidade moderada a fraca. A partir do mês de junho foi evidenciado o desenvolvimento do episódio quente do fenômeno El Niño, que se estabeleceu nos meses subsequentes, mais precisamente até maio de 2010. Pois a partir de junho o fenômeno La Niña voltou a atuar. Em 2011 o La Niña foi perdendo intensidade até junho, quando já se constatavam padrões de neutralidade.

Em Porto Alegre o comportamento climático do período ocasionou as observações meteorológicas, em relação à precipitação pluviométrica, apresentadas na Figura 4.9. Pode-se

notar que os volumes de chuva em agosto de 2009 foram maiores que os da média histórica, enquanto, em 2010 foram os meses de junho e julho que registraram precipitações acima da média histórica. Entretanto, esses comportamentos não resultaram em diferenças significativas nas concentrações de PM10.

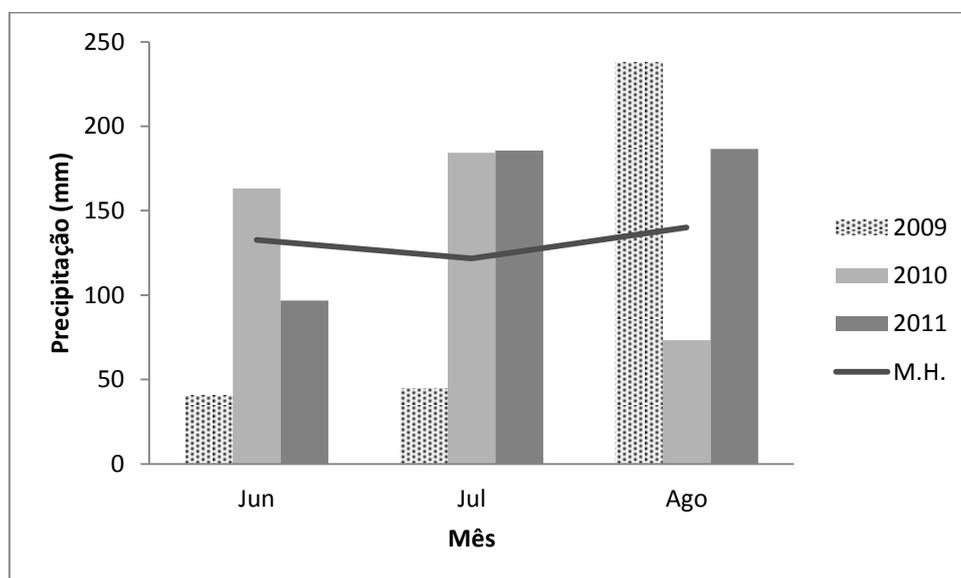


Figura 4.9. Evolução do volume acumulado mensal de chuva em comparação com a média histórica (M.H.).

Em relação às temperaturas, segundo a MetSul Meteorologia, o inverno de 2011 apresentou uma frequência muito alta de massas de ar polar. Desde 1993, Porto Alegre não tinha os três principais meses da estação (junho, julho e agosto) com temperatura abaixo da média histórica. Junho teve média de 13,7°C contra uma normal de 14,3°C, julho fechou com 13,2°C e desvio negativo de 1,2°C em relação à média histórica de 14,4°C, e agosto terminou com 14,8°C, ou seja, 0,4°C inferior à normal de 15,2°C. Porém os anos de 2009 e 2010 também registraram temperaturas médias mensais abaixo do padrão histórico. Em 2010 a média em agosto esteve abaixo do padrão, assim como em junho e julho de 2009.

O comportamento dos elementos climáticos, portanto, apontariam a uma tendência de comportamento nas concentrações de material particulado similar entre os meses de junho dos anos de 2009 e 2011. Porém não foi o que ocorreu. Analisando, agora, as fontes móveis de poluição, segundo o DETRAN-RS, a frota em circulação de Porto Alegre, de dezembro de 2009 a setembro de 2011, subiu 7,4%. Ou seja, houve um incremento de 48.775 veículos nesse período. Devem-se somar a estes, ainda, os aumentos nas frotas das cidades da região metropolitana, origem de muitos veículos que circulam em Porto Alegre.

O ano de 2011 foi, ainda, marcado por um evento de proporções globais, em relação à emissão de material particulado, a erupção do vulcão chileno Puyehue Cordón-Caulle (localizado a 40°35'25"S e 72°7'7"O) no dia quatro de junho. Evento que possivelmente contribuiu para uma concentração média de PM10 mais elevada em junho de 2011.

No dia 07/06/2011 foi registrado pela MetSul Meteorologia a partir de imagens de satélite, que as cinzas vulcânicas estavam sob a região de Porto Alegre trazidas por correntes de vento entre 5 e 10 mil metros de altitude. No dia 12 do mesmo mês a MetSul divulgou o rápido avanço de nova nuvem vulcânica, devido à circulação de vento muito intensa em altitude na costa da Patagônia, deslocando a nova nuvem de cinzas rapidamente em direção ao Centro e ao Norte da Argentina assim como para o Sul do Brasil. Nesse dia, a análise por satélite mostrava que as cinzas avançam em altitudes mais baixas do que no episódio do dia sete, com possibilidade de precipitação de cinzas em Porto Alegre nos dois dias subsequentes.

Em meio a essas notícias, as concentrações médias diárias de PM10 entre os dias 12 e 16 de junho estão representadas na Tabela 4.2. Esse período registrou 4 dos 5 maiores valores registrados no mês. Os dias apresentavam características típicas de inverno com tendência a estabilidade atmosférica, porém com temperaturas médias acima da mensal e, também, sem precipitação pluviométrica. De posse destes dados é muito provável a influência da precipitação das cinzas vulcânicas na ocorrência de valores mais elevados no ano de 2011 em comparação a 2009 e a 2010.

Tabela 4.2. Resposta da concentração média diária de particulados frente à presença de cinzas vulcânicas sobre a região de Porto Alegre.

Data	Concentração de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
12/06/2011	76,6
13/06/2011	65,2
14/06/2011	92,7
15/06/2011	80,3
16/06/2011	80,5

5. Conclusões

A faixa variabilidade das concentrações de PM10 na zona urbana de Porto Alegre, no período de janeiro de 2009 a agosto de 2011 manteve os valores medidos dentro do padrão estabelecido pela Resolução CONAMA 003/1990. Segundo o IQAr, a qualidade do ar em relação às partículas inaláveis pode ser classificada como boa em 85% dos dias e como regular em 15% dos dias amostrados.

A ANOVA e o teste de Tukey indicaram diferença significativa entre as concentrações de PM10 na estação CEASA, com a maior média, e a estação 8° Disme. A estação Centro, entretanto, não apresentou diferença em relação a elas. Os motivos principais atribuídos a tal resultado foram a topografia e o tráfego das regiões.

Em relação às horas do dia, foi obtida diferença entre os períodos do início da noite (19h) até a manhã (10h) do dia seguinte, e o período da tarde, cujas médias foram significativamente menores. Esse resultado vai ao encontro do obtido em São Paulo por Castanho e Artaxo (2001), comprovando a influência do aquecimento da superfície, com consequente alteração nas características da CLP na maior dispersão do material particulado durante a tarde.

A análise estatística indicou também diferença significativa entre as médias medidas na quarta-feira e as medidas no sábado e no domingo. Pode-se, assim, relacionar essa variabilidade nas concentrações do poluente, com a diminuição do tráfego de veículos no Centro Histórico, durante o fim de semana.

Com relação aos meses, junho, julho e agosto apresentaram valores significativamente maiores que os outros meses, principalmente em comparação a janeiro. Esse resultado retrata a influência de fatores meteorológicos característicos do inverno, como a ocorrência de episódios de inversão térmica de superfície.

A comparação entre os oito primeiros meses dos anos de 2009, 2010 e 2011 mostrou, para 2011, uma diferença significativamente maior em relação aos demais anos. Como prováveis motivos estão a influência da precipitação, em Porto Alegre, das cinzas oriundas da erupção do vulcão chileno Puyehue Cordón-Caulle no mês de junho além do inverno rigoroso, combinado ao aumento da frota circulante de veículos.

A provável contribuição de fontes distantes, em relação à zona urbana de Porto Alegre, mostrou ter relevante influência no aumento das concentrações de PM₁₀. Esse fato ressalta a importância de monitorar a qualidade do ar a partir de redes de monitoramento, ou seja, integrar os dados medidos e padronizar procedimentos e métodos, tanto das estações já existentes como das futuras estações a serem instaladas. Assim, seria possível atingir uma abrangência estadual e até mesmo nacional em relação ao estudo qualidade do ar.

Apesar da metodologia de determinação da variabilidade utilizada neste trabalho permitir a identificação das fontes mais prováveis de particulados, algumas informações são indispensáveis para efetiva determinação dessas fontes. A análise química das partículas retidas nos filtros dos amostradores, somada ao registro das condições meteorológicas nos locais de monitoramento e à composição aproximada das emissões geradas pelas prováveis fontes de poluição, são informações básicas para determinação das fontes mais relevantes de PM₁₀ em determinado local e período.

6. Referências

BRAGA, C.F. TEIXEIRA, E.C. MEIRA, L. WIEGAND, F. YONEAMA, M.L. DIAS, J.F. *Elemental composition of PM₁₀ and PM_{2.5} in urban environment in South Brazil*. 2005. Atmospheric Environment. 39. 1801-1815.

BRUM, D.R. *Estudo da composição química do material particulado fino (MP_{2,5}) em Porto Alegre e Belo Horizonte*. 2010. Tese de Doutorado. USP.

CASTANHO, A.D.A. ARTAXO, P. *Wintertime and summertime São Paulo aerosol source apportionment study*. 2001. Atmospheric Environment. 35. 4889-4902.

CONAMA. *Resolução 003/1990*.

FEPAM. *Relatório da qualidade do ar 2001-2002*.

- FERRARO, L.W. HASENACK, H. *Aspectos do clima de Porto Alegre*. 2000. PMPA, A Qualidade do Ar em Porto Alegre, 16-27.
- FONTOURA, F.P. *Dimensionamento e gestão de uma rede de monitoramento da qualidade do ar. Estudo de caso: município de Porto Alegre*. 2007. Trabalho de Conclusão em Engenharia Química. UFRGS.
- JUNENG, L. LATIF, M. T. TANANG, F. *Factors influencing the variations of PM10 aerosol dust in Klang Valley, Malaysia during the summer*. 2011. Atmospheric Environment, 45, 4370-4378.
- KUPIAINEN, K.J. PIRJOLA, L. *Vehicle non-exhaust emission from the tyre-road interface-effect of stud properties, traction sanding and resuspension*. 2011. Atmospheric Environment. 45. 4141-4146.
- LIMA, E.A.P. *Um estudo sobre a qualidade do ar em Uberlândia: material particulado em suspensão*. 2007. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia.
- MIGLIAVACCA, D. TEIXEIRA, E.C. WIEGAND, F. MACHADO, A.C.M. SANCHEZ, J. *Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaíba hydrographic basin, Brazil*. 2005. Atmospheric Environment. 39. 1829-1844.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *1º Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários*. 2011. Brasília. 111p.
- MONTGOMERY, D.C. *Design and analysis of experiments*. 2009. John Wiley and Sons, 7th ed. 656p.
- OLIVEIRA, G.S. *O El Niño e você, o fenômeno climático*. 1999. Transtec Editorial, 115p.
- POPE, C.A. BATES, D.V. RAIZENNE, M.E. *Health effects of particulate air pollution: time for reassessment?* 1995. Environmental Health Perspectives, 103, 472-480.
- RAYA-RODRIGUEZ, M.T. *O uso de bioindicadores para avaliação da qualidade do ar em Porto Alegre*. 2000. PMPA, A Qualidade do Ar em Porto Alegre. 68-76.
- SEINFELD, J.H. PANDIS, S.N. *Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change*. 2006. Wiley and Sons, New York, 2nd ed. 1203p.
- UFRGS, PMPA, INPE. *Atlas ambiental de Porto Alegre*. 1998. Editora Universidade/UFRGS. 232p.
- US EPA. *Determination of PM10 in ambient air using the Andersen continuous beta attenuation monitor*. 1999. Cincinnati. 33p.
- US EPA. *Meteorological measurements version 2.0. (final)*. 2008. North Carolina. 32p.
- US EPA. *Sampling of ambient air for Total Suspended Particulate Matter (SPM) and PM10 using High Volume (HV) Sampler*. 1999. Cincinnati. 78p.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. 2005. Genebra. 20p.
- YURDANUR, S.U. TOROS, H. DENIZ, A. INCECIK, S. *Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM10 concentrations in Istanbul metropolitan area*. 2011. Atmospheric Environment, 45, 5504-5513.
- www.bevoelkerungsstatistik.de, acesso em novembro de 2011.

www.clima.icea.gov.br, acesso em agosto de 2011.

www.detran.rs.gov.br, acesso em outubro de 2011.

www.fepam.rs.gov.br, acesso em setembro de 2011.

www.inmet.gov.br, acesso em agosto de 2011.

www.metsul.com, acesso em novembro de 2011.

www.opsis.se, acesso em outubro de 2011.

www.portoalegre.rs.gov.br, acesso em setembro de 2011.

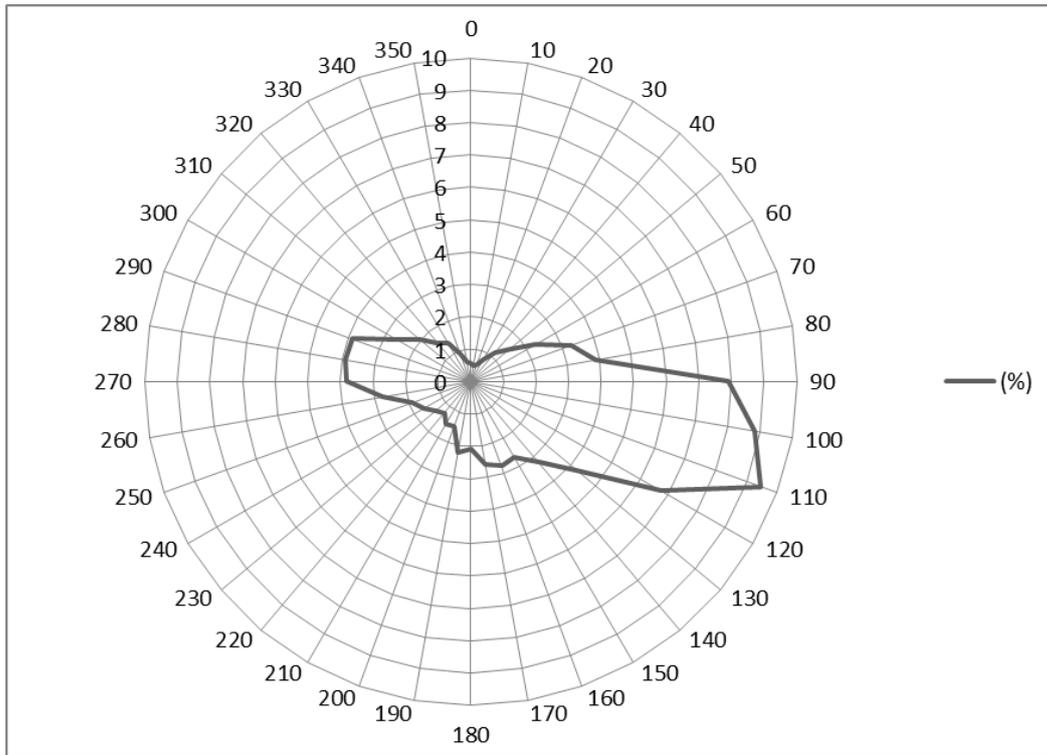
www.ceasa.rs.gov.br, acesso em outubro de 2011.

Anexo A - Normais Climatológicas

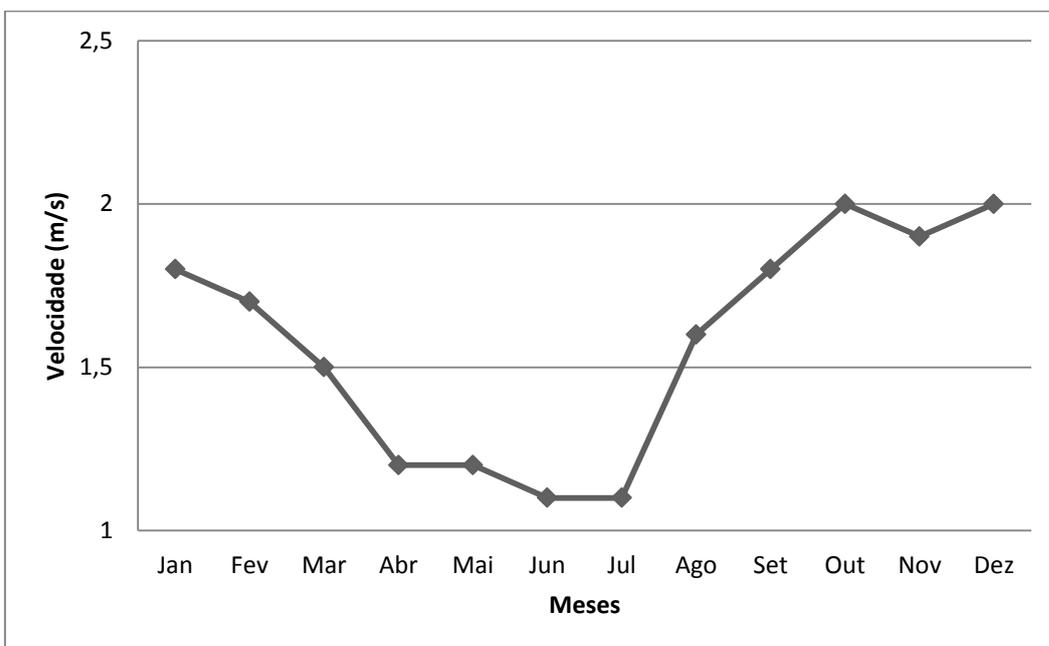
Normais Climatológicas: Porto Alegre (1961 - 1990)						
Mês	Temperaturas Médias (°C)			Umidade Relativa (%)	Precipitação Acumulada (mm)	Insolação Total (h)
	Mínima	Média	Máxima			
Janeiro	20,5	24,6	30,2	71	100,1	239,0
Fevereiro	20,8	24,7	30,1	74	108,6	208,1
Março	19,3	23,1	28,3	75	104,4	200,7
Abril	16,3	20,1	25,2	77	86,1	180,3
Maiο	13,0	16,8	22,1	81	94,6	166,1
Junho	10,7	14,3	19,4	82	132,7	136,0
Julho	10,7	14,5	19,7	81	121,7	148,6
Agosto	11,5	15,3	20,4	79	140,0	151,1
Setembro	13,1	16,8	21,8	78	139,5	151,2
Outubro	15,0	19,2	24,4	74	114,3	201,9
Novembro	17,0	21,3	26,7	71	104,2	216,6
Dezembro	18,9	23,2	29,0	69	101,2	245,2
Ano	15,6	19,5	24,8	76	1347,4	2244,6

Fonte INMET, 2011

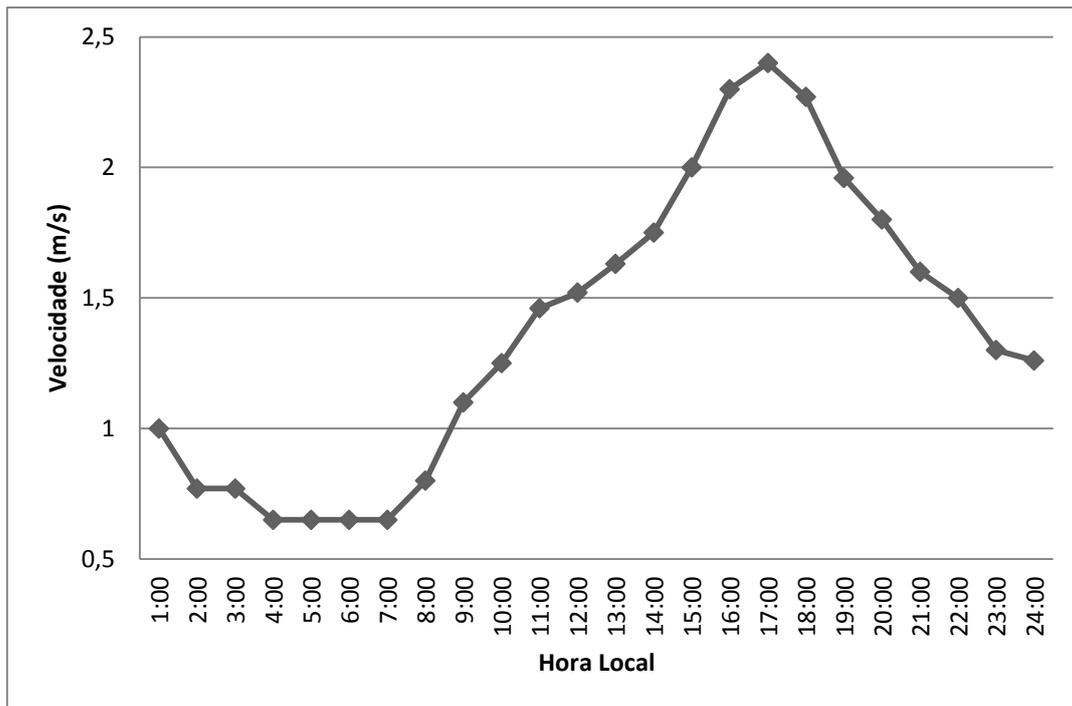
Anexo B – Direção e Velocidade dos Ventos



Frequência percentual das direções médias dos ventos, em graus, entre janeiro de 2009 e agosto de 2011, medidas no 8º Distrito de Meteorologia de Porto Alegre.



Perfil das velocidades médias mensais dos ventos em Porto Alegre, incluindo as calmarias, fornecidas pelo 8º Distrito de Meteorologia. Valores referentes ao período de 1961 a 1990.



Perfil das velocidades médias horárias dos ventos em Porto Alegre, incluindo as calmarias, fornecidas pelo 8º Distrito de Meteorologia. Valores referentes ao período de 1961 a 1990.

Anexo C – Dispersão das Cinzas Oriundas de Queimadas

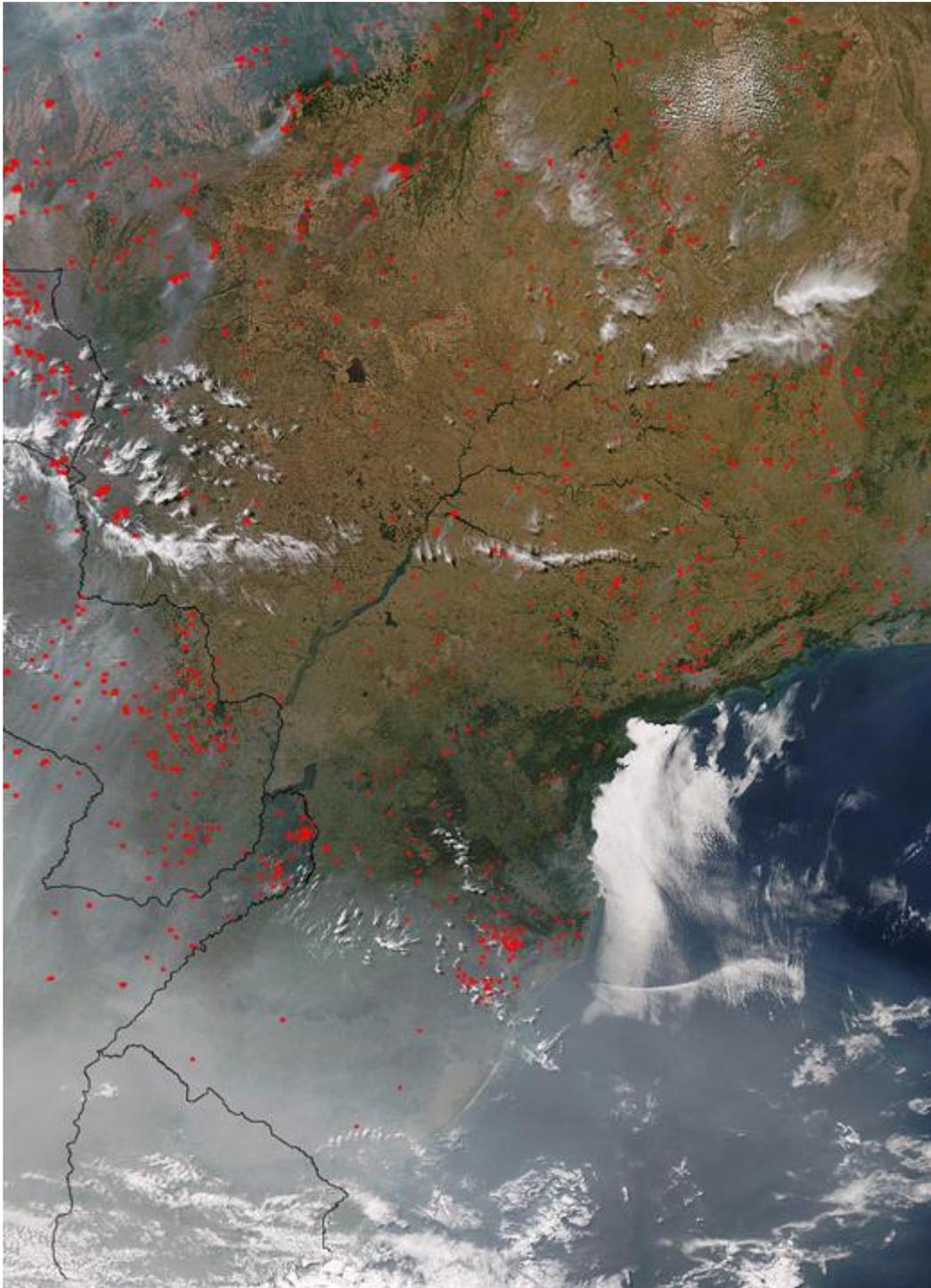


Imagem de satélite, captada no dia 24 de agosto de 2010, mostra a extensão da cobertura de fumaça no Brasil e como ela se origina na Bolívia e no Centro-Norte do Brasil, percorrendo o Paraguai e o Norte da Argentina, até chegar ao Sul do Brasil e o Uruguai (fonte MetSul Meteorologia).

Anexo D – Dispersão das Cinzas Vulcânicas



Imagens de satélite captadas no dia 14/06/2011. As cinzas vulcânicas sobre o território do Rio Grande do Sul traçavam uma faixa nítida nas imagens, que se iniciava na fronteira com o Uruguai e alcançava até o nordeste do estado (fonte MetSul Meteorologia).