



**ESTUDO DAS PARTÍCULAS SUBMICROMÉTRICAS
(MP₁) E COMPARAÇÃO COM PARTÍCULAS INALÁVEIS
FINAS (MP_{2,5}) NA ATMOSFERA DE SÃO PAULO**



| Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente

Governo do Estado de São Paulo
João Doria - Governador do Estado de São Paulo

Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente
Marcos Penido - Secretário de Estado

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Patrícia Iglecias - Diretora-Presidente

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Diretoria de Gestão Corporativa
Clayton Paganotto - Diretor

Diretoria de Controle e Licenciamento Ambiental
Zuleica Maria de Lisboa Perez - Diretora

Diretoria de Avaliação de Impacto Ambiental
Domenico Tremaroli - Diretor

Diretoria de Engenharia e Qualidade Ambiental
Carlos Roberto dos Santos - Diretor

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO



ESTUDO DAS PARTÍCULAS SUBMICROMÉTRICAS (MP₁) E COMPARAÇÃO COM PARTÍCULAS INALÁVEIS FINAS (MP_{2,5}) NA ATMOSFERA DE SÃO PAULO

CETESB COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

São Paulo ▪ 2020

Dados Internacionais de Catalogação

(CETESB – Biblioteca, SP, Brasil)

C418e CETESB (São Paulo)
Estudo das partículas submicrométricas (MP₁) e comparação com partículas inaláveis finas (MP_{2,5}) na atmosfera do município de São Paulo [recurso eletrônico] / CETESB ; Elaboração Cristiane F. Fernandes Lopes (Coordenação técnica) ; Equipe de trabalho Daniele P.R. de Carvalho ... [et al.] ; Colaboração Claudio Darwin Alonso, Yoshio Yanagi. - - São Paulo : CETESB, 2020.
1 arquivo de texto (28 p.) : il. color., PDF ; 3 MB

Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>>.
ISBN 978-65-5577-008-7

1. Ar – qualidade – controle 2. Ar – poluição 3. Partículas inaláveis finas 4. Partículas submicrométricas 5. São Paulo (SP) I. Título.

CDD (21.ed. Esp.) 363.739 263 816 1 CDU (2.ed. Port.) 502.175:614.71/.72 (815.6)

Catalogação na fonte: Margot Terada - CRB 8.4422

Direitos reservados de distribuição e comercialização.
Permitida a reprodução desde que citada a fonte.

© CETESB 2020.
Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345
Pinheiros – SP – Brasil – CEP 05459900

Ficha Técnica

Diretoria de Engenharia e Qualidade Ambiental

Carlos Roberto dos Santos

Departamento de Qualidade Ambiental

Maria Helena R. B. Martins

Divisão de Qualidade do Ar

Maria Lúcia Gonçalves Guardani

Setor de Amostragem e Análise do Ar

Cristiane F. Fernandes Lopes

Elaboração

Cristiane F. Fernandes Lopes (**Coordenação Técnica**)

Equipe de Trabalho

Daniele P. R. de Carvalho

Giacomo C. Grizzo Cuoco

Graziela Mônaco Locchi

Jesuíno Romano

Maria Cristina N. de Oliveira

Nelson Álamo Filho

Sheila de Castro

Viviane A. de Oliveira Ferreira

Colaboração

Claudio Darwin Alonso

Yoshio Yanagi

Produção Editorial e Distribuição

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345 - Alto de Pinheiros

São Paulo - SP - Brasil - 05459-900

Telefone: +55 11 3133.3000

<http://www.cetesb.sp.gov.br>

Resumo

As características do material particulado em suspensão na atmosfera variam muito em razão de sua composição química e física, das fontes de emissão e do tamanho da partícula. As frações de aerossol mais comumente monitoradas são as partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 10 \mu\text{m}$ (MP_{10}), partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$) - também chamadas partículas inaláveis finas e partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 1 \mu\text{m}$ (MP_1), denominadas partículas submicrométricas.

O MP_{10} representa a faixa de tamanho de partículas que podem passar pelo nariz e pela boca, já o $\text{MP}_{2,5}$ é a faixa de partículas que podem entrar no trato respiratório e atingir partes mais profundas dos pulmões. O MP_1 é a fração de partículas que inclui quantidades apreciáveis de partículas ainda menores e que podem penetrar profundamente na região alveolar e em seguida entrar na circulação sanguínea.

A CETESB, de maneira pioneira, com o intuito de avaliar os níveis desse parâmetro, realizou, em 2017, o monitoramento das partículas submicrométricas (MP_1), em paralelo com as partículas inaláveis finas ($\text{MP}_{2,5}$), nas estações de Cerqueira César, Ibirapuera, Marginal Tietê–Ponte dos Remédios e Pinheiros localizadas no município de São Paulo, cujos resultados são objeto de análise deste relatório.

Foram realizadas análises de dados diários, médias anuais; gráficos de perfil por dia da semana; análises utilizando *boxplot*; correlação dos dados diários obtidos em ambas as faixas de tamanho (MP_1 e $\text{MP}_{2,5}$) e comparação com dados obtidos em outras localidades.

Palavras chaves: Partículas Inaláveis finas, Partículas submicrométricas, Poluição do Ar, Qualidade do Ar

Listas de Ilustrações e Tabelas

Figuras

Figura 1 – Estação Cerqueira César	14
Figura 2 – Estação Ibirapuera	14
Figura 3 – Estação Marg. Tietê–Ponte dos Remédios.....	15
Figura 4 – Estação Pinheiros.....	15

Gráficos

Gráfico 1 – Boxplot das concentrações diárias de $MP_{2,5}$ e MP_1 , por estação – 2017	18
Gráfico 2 – Perfil das concentrações diárias de $MP_{2,5}$ – 2017	19
Gráfico 3 – Perfil das concentrações diárias de MP_1 , por estação – 2017.....	19
Gráfico 4 – Perfil das concentrações diárias de $MP_{2,5}$ e MP_1 , por estação monitorada	20
Gráfico 5 – Dispersão dos dados de $MP_{2,5}$ e MP_1 por estação	21
Gráfico 6 – Concentrações médias de $MP_{2,5}$ e MP_1 por dia da semana.....	22
Gráfico 7 – Correlação dos dados de $MP_{2,5}$ do Ibirapuera em função das demais estações	22
Gráfico 8 – Dispersão dos dados de MP_1 do Ibirapuera em função das demais estações.....	23

Mapas

Mapa 1 – Localização dos pontos de amostragem.....	13
--	----

Tabelas

Tabela 1 – Padrões estaduais de qualidade do ar para $MP_{2,5}$	12
Tabela 2 – Concentrações médias anuais e máximas diárias de $MP_{2,5}$ e MP_1 – 2017	17
Tabela 3 – Razão $MP_1/MP_{2,5}$ e o desvio padrão nas estações monitoradas.....	20
Tabela 4 – Médias de $MP_{2,5}$ e MP_1 obtidos em diferentes localidades	24

Lista de Abreviaturas e Siglas

CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CHN	China
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
ESP	Espanha
EUA	Estados Unidos da América
GRE	Grécia
HKG	Hong Kong
MAA	média aritmética anual
MP	material particulado
N	número de dias com representação diária dos dados
MI	Meta Intermediária
OMS	Organização Mundial de Saúde
PF	Padrão final
PTS	Partículas Totais em suspensão
TUR	Turquia

Lista de Símbolos

°C	graus Celsius
MP ₁₀	partículas inaláveis
MP _{2,5}	partículas inaláveis finas
MP ₁	partículas submicrométricas
SO ₂	dióxido de enxofre
NO _x	óxidos de nitrogênio
µg	micrograma
µm	micrômetro
µg/m ³	micrograma por metro cúbico
L/min	litros por minuto
km	quilômetro
km ²	quilômetro quadrado
R	coeficiente de correlação

Sumário

1 Introdução	11
2 Objetivo	12
3 Padrão Estadual de Qualidade do Ar.....	12
4 Amostragem e Análise.....	13
<i>4.1 Local de Amostragem.....</i>	<i>13</i>
<i>4.2 Metodologia de Amostragem e Análise.....</i>	<i>16</i>
<i>4.3 Período e Duração da Amostragem</i>	<i>16</i>
5 Resultados	17
6 Comparação com dados ambientais de outros locais	24
7 Conclusões	25
Referências	26
Apêndice	28

1 Introdução

As características do material particulado em suspensão na atmosfera variam muito em função de sua composição química e física, das fontes de emissão e do tamanho da partícula. (DIOCIAIUTI, 2001; CHO, 2009). Portanto, é importante medir a distribuição de tamanho das partículas transportadas pelo ar ou, pelo menos, a concentração de algumas frações selecionadas de partículas e sua composição química. A maioria dos pesquisadores concorda que as seguintes frações de aerossol devem ser monitoradas: partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 10 \mu\text{m}$ (MP_{10}), partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$) - também chamadas partículas inaláveis finas e partículas com diâmetro aerodinâmico $\leq 1 \mu\text{m}$ (MP_1), denominadas partículas submicrométricas.

As partículas inaláveis finas ($\leq 2,5 \mu\text{m}$) são classificadas como primárias, aquelas emitidas diretamente para a atmosfera, ou secundárias, aquelas formadas por reações químicas na atmosfera. Parte dessas partículas são produzidas em tamanhos muito pequenos ($\leq 1 \mu\text{m}$), nesta faixa de nucleação, crescem rapidamente por coagulação (combinação de duas ou mais partículas para formar uma partícula maior).

Partículas submicrométricas ($\leq 1 \mu\text{m}$) podem ser produzidas também pela condensação de metais ou compostos orgânicos que são vaporizados em processos de combustão sob altas temperaturas e pela condensação de gases precursores que serão convertidos por reações químicas na atmosfera, a partir de substâncias de baixa pressão de vapor. Os principais gases precursores são os óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2), amônia e compostos orgânicos voláteis, que são emitidos principalmente em processos de combustão, transformando-se em partículas como resultado de reações químicas no ar. A fração fina, por essa razão, é composta tipicamente de nitratos e sulfatos de amônio, carbono elementar, carbono orgânico, componente de um grande número de compostos, e traços de metais (IZHAR, 2016).

As partículas inaláveis, além de criarem problemas de visibilidade e incômodo, estão associadas a problemas de saúde, incluindo riscos maiores de doenças cardíacas e pulmonares.

O MP_{10} representa a faixa de tamanho de partículas que podem passar pelo nariz e pela boca (POPE, 1999), já o $\text{MP}_{2,5}$ representa a faixa de partículas que podem entrar no trato respiratório e atingir partes mais profundas dos pulmões (WICHMANN, 2004) e o MP_1 que é a fração de partículas que inclui quantidades apreciáveis de partículas ainda menores e que podem penetrar profundamente na região alveolar e em seguida entrar na circulação sanguínea, incluindo riscos maiores de doenças cardíacas e pulmonares (WICHMANN, 2000; KLEJNOWSK, 2012)

A CETESB, de maneira pioneira, com o intuito de avaliar os níveis desse parâmetro, realizou, em 2017, o monitoramento das partículas submicrométricas (MP_1), em paralelo com as partículas inaláveis finas ($\text{MP}_{2,5}$), no município de São Paulo, cujos resultados são objeto de análise deste relatório.

2 Objetivo

Avaliar as concentrações e comportamento das partículas inaláveis finas ($MP_{2,5}$) e das partículas submicrométricas (MP_1) obtidas na atmosfera de São Paulo, nas estações de Cerqueira César, Ibirapuera, Marginal Tietê–Ponte dos Remédios e Pinheiros pertencentes a rede de avaliação da qualidade do ar da CETESB, em 2017.

3 Padrão Estadual de Qualidade do Ar

Para propósitos de regulamentação de padrão, o material particulado (MP) é classificado pelo diâmetro aerodinâmico. Como o tamanho é um determinante crítico do local de deposição no trato respiratório, dados evidenciam a associação do risco com o tamanho específico da partícula. Inicialmente, regulamentações e guias orientadores foram estabelecidos por métodos de medições de concentração de material particulado não tão específicos quanto ao tamanho de corte das partículas, como as partículas totais em suspensão (PTS) nos EUA, e fumaça preta na Europa. Em 1987, os Estados Unidos promulgaram um padrão de MP_{10} e, em 1997, foi incluído um novo padrão de $MP_{2,5}$. Em 2005, a Organização Mundial da Saúde (OMS) publicou um novo documento com novos valores orientadores tanto para o MP_{10} como para o $MP_{2,5}$.

No Brasil, os padrões para MP foram estabelecidos em 1976 para o Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 1976), com a adoção do parâmetro PTS e, em 1990, para o material particulado inalável (MP_{10}) para todo o Brasil (BRASIL, 1990). Em 2013, o Estado de São Paulo estabeleceu padrões para o $MP_{2,5}$ (SÃO PAULO, 2013), sendo seguido nacionalmente em 2018 (BRASIL, 2018).

A exemplo do que ocorre em outros países, não há um padrão de qualidade do ar para MP_1 no Brasil.

O Decreto Estadual nº 59.113, de 23/04/2013 (SÃO PAULO, 2013), estabelece que a administração da qualidade do ar no território do Estado de São Paulo será efetuada através de Padrões de Qualidade do Ar, observados os seguintes critérios:

I. Metas Intermediárias - (MI) estabelecidas como valores temporários a serem cumpridos em etapas, visando à melhoria gradativa da qualidade do ar no Estado de São Paulo, baseada na busca pela redução das emissões de fontes fixas e móveis, em linha com os princípios do desenvolvimento sustentável;

II. Padrões Finais (PF) - Padrões determinados pelo melhor conhecimento científico para que a saúde da população seja preservada ao máximo em relação aos danos causados pela poluição atmosférica.

A **Tabela 1** apresenta os padrões de qualidade do ar para as partículas inaláveis finas - $MP_{2,5}$, de curto e longo prazos, estabelecidos no Decreto Estadual nº 59.113/2013 (SÃO PAULO, 2013), sendo que os padrões vigentes estão assinalados em vermelho.

**Tabela 1 – Padrões estaduais de qualidade do ar para $MP_{2,5}$
(Decreto Estadual nº 59.113, de 23/04/13)**

Poluente	Tempo de Amostragem	MI 1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI 2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI 3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
partículas inaláveis	24 horas	60	50	37	25
finas ($MP_{2,5}$)	MAA ¹	20	17	15	10

Fonte: CETESB (2020) adaptado do Decreto Estadual nº 59.113 (SÃO PAULO, 2013)

Nota: padrões vigentes em vermelho.

1 - Média aritmética anual.

Figura 1 – Estação Cerqueira César

Fonte: CETESB (2020)

A estação **IBIRAPUERA (Figura 2)** localiza-se na zona sul da cidade, no interior do Parque do Ibirapuera, em uma região de área verde de 1.584 km² circundada por áreas urbanizadas. Está afastada de fontes de emissão de influência direta (veículos) sendo considerada uma estação de escala urbana, relativa à representatividade espacial de cidades ou regiões metropolitanas de 4 a 50 km (CETESB, 2004).

Figura 2 – Estação Ibirapuera

Fonte: CETESB (2020)

A estação **MARGINAL TIETÊ–PONTE DOS REMÉDIOS (Figura 3)** localiza-se na Vila Leopoldina, zona oeste do município de São Paulo. A estação está instalada no Centro de Treinamento do Comando de Policiamento Rodoviário da Polícia Militar, distante cerca de 15 metros da Marginal do Tietê (sentido

norte), que possui tráfego intenso tanto de veículos leves como pesados (caminhões), sendo considerada uma estação de microescala (CETESB, 2014).

Figura 3 – Estação Marg. Tietê–Ponte dos Remédios



Fonte: CETESB (2020)

A estação **PINHEIROS (Figura 4)**, localizada na zona oeste do município de São Paulo, está instalada na sede da CETESB, a cerca de 300 metros da Marginal Pinheiros e distante cerca de 7 metros da Av. Prof. Frederico Hermann Jr, que possui tráfego intenso, como pesados (ônibus), sendo considerada uma estação de microescala. Essa escala espacial caracteriza-se por estar localizada próxima às fontes de emissão, nesse caso as vias de tráfego, abrangendo áreas de dimensões de poucos metros a 100 metros.

Figura 4 – Estação Pinheiros



Fonte: CETESB (2020)

4.2 Metodologia de Amostragem e Análise

O equipamento utilizado foi um amostrador de material particulado na atmosfera da Thermo Fischer Scientific, Partisol 2000i, designado como equipamento de referência pela Agência Ambiental dos EUA para medições de partículas de $MP_{2,5}$ (método de referência da U.S.EPA RFPS-1298-126). Nesse sistema, o ar é aspirado através de uma entrada especialmente projetada, que permite a passagem somente das partículas inaláveis ($\leq 10 \mu\text{m}$) e posteriormente passa por um impactador de partículas que seleciona somente as partículas inaláveis finas com tamanho igual ou inferior a $2,5 \mu\text{m}$ ou $1 \mu\text{m}$, dependendo do impactador utilizado.

Os impactadores utilizados foram projetados e fabricados pela BGI Incorporated, o $MP_{2,5}$ é um VSCC® (Very Sharp Cut Cyclone) e o MP_1 um Sharp Cut Cyclone (SCC-2.229).

O equipamento foi calibrado utilizando-se um medidor de vazão do tipo tubo Venturi.

As amostras foram coletadas em filtros de teflon® com vazão de amostragem de $16,7 \text{ L/min}$. As massas das partículas coletadas nos filtros foram determinadas por pesagem em microbalança Metler, modelo M3. Os filtros utilizados foram condicionados para pesagem, antes e depois da amostragem, em câmara com umidade relativa controlada (cerca de 40%) e temperatura controlada (entre 18 e 23°C), evitando-se assim alterações de umidade que pudessem interferir nas massas a serem determinadas. As cargas eletrostáticas dos filtros, outra possível fonte de interferência na operação de pesagem, são neutralizadas pela presença da fonte radioativa de Amerício (Am-241). A concentração foi calculada a partir da massa de amostra coletada, determinada gravimetricamente, e do volume de ar amostrado, obtido a partir da vazão média de amostragem.

4.3 Período e Duração da Amostragem

O período de amostragem foi de 01/01/2017 a 30/12/2017. As amostragens foram realizadas a cada seis dias por períodos de 24 horas, totalizando, em média, 50 amostras por estação.

5 Resultados

As concentrações médias anuais e as máximas diárias de MP obtidas nas estações Cerqueira César, Ibirapuera, Marg. Tietê–Ponte dos Remédios e Pinheiros, tanto para MP_{2,5} quanto MP₁, em 2017, estão apresentadas na **Tabela 2**.

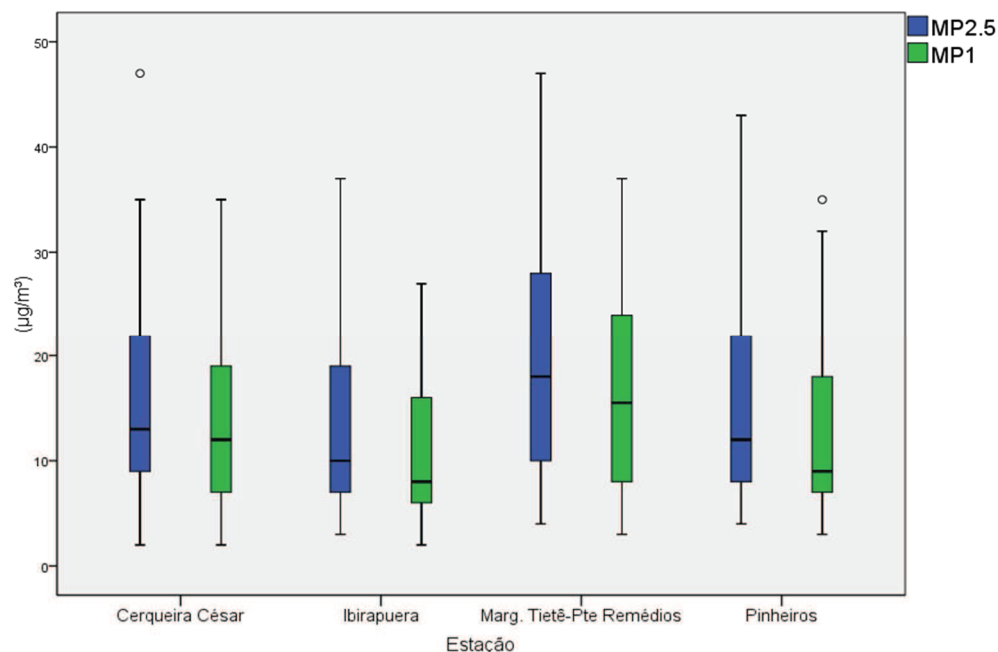
Tabela 2 – Concentrações médias anuais e máximas diárias de MP_{2,5} e MP₁ – 2017

Estação	N (nº de dados)	MP _{2,5} (µg/m ³)		MP ₁ (µg/m ³)	
		Média	Máxima	Média	Máxima
Cerqueira César	54	16	47	13	35
Ibirapuera	48	13	37	11	27
Marg. Tietê – Pte dos Remédios	54	21	47	16	37
Pinheiros	47	16	43	13	35

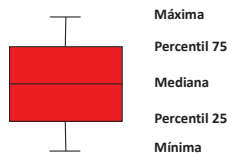
Fonte: CETESB (2020)

Observa-se na **Tabela 2** que, no caso do MP_{2,5}, não houve ultrapassagem do padrão diário de 60 µg/m³ em nenhuma das estações monitoradas. O padrão anual (20 µg/m³) foi ultrapassado na estação Marg. Tietê–Ponte dos Remédios. Embora sem padrão estabelecido para MP₁, a maior concentração média anual também foi observada na Ponte dos Remédios.

O **Gráfico 1** é um *boxplot*, diagrama que permite visualizar a distribuição dos dados. São apresentadas as concentrações diárias de MP_{2,5} e MP₁, por estação de monitoramento. A estação Marg. Tietê–Ponte dos Remédios foi a que apresentou maior variabilidade de dados, tanto para MP_{2,5} quanto para MP₁. Nessa estação observa-se que 75% dos dados de MP_{2,5} estão abaixo de 28 µg/m³ e 75% dos dados de MP₁ estão abaixo de 24 µg/m³. Já a estação Ibirapuera foi a que apresentou a menor variabilidade sendo que 75% dos dados de MP_{2,5} estão abaixo de 19 µg/m³ e 75% dos dados de MP₁ abaixo de 16 µg/m³.

Gráfico 1 – Boxplot das concentrações diárias de MP_{2,5} e MP₁, por estação – 2017

Legenda:

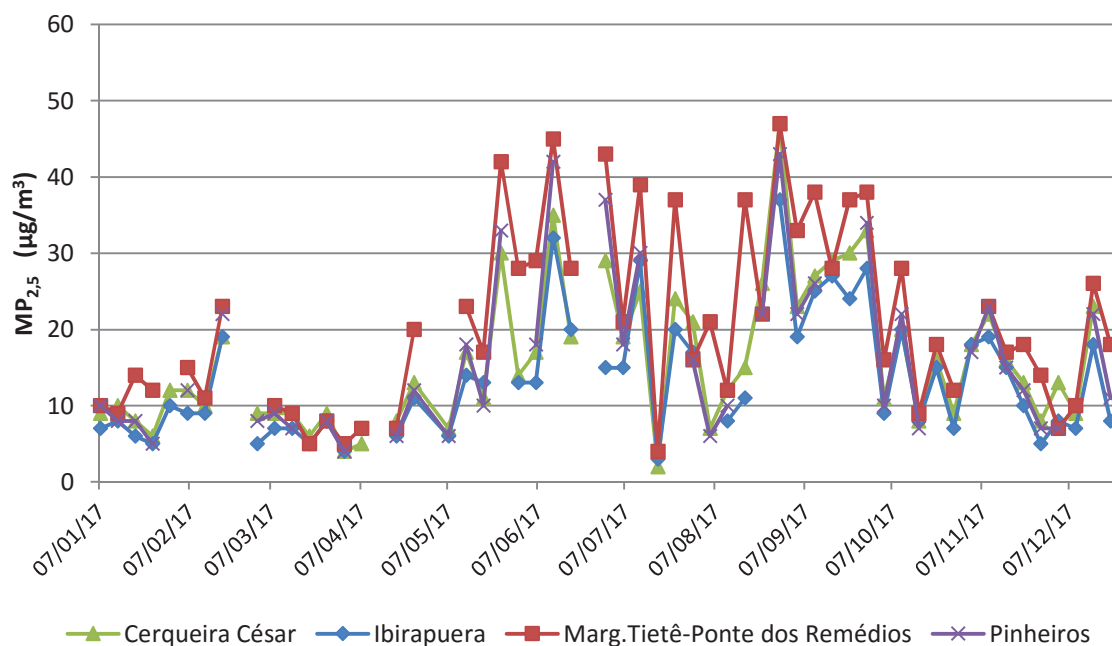


Fonte: CETESB (2020)

Além da descrição do comportamento das concentrações em cada estação, apresentado acima, foi também analisado o comportamento dos dados no conjunto das estações.

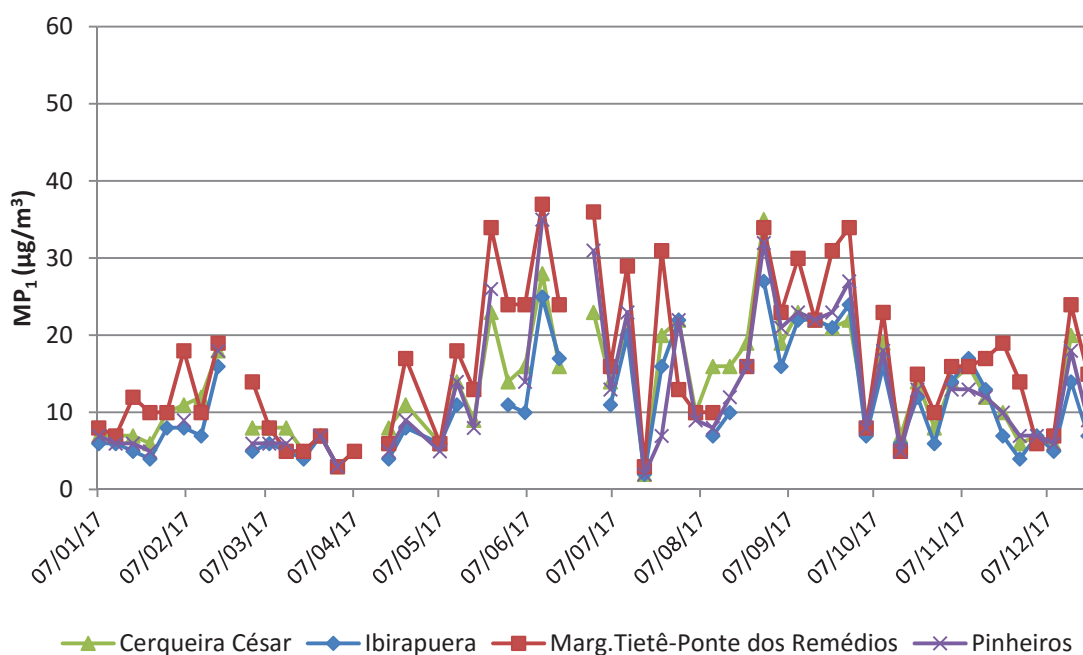
As concentrações diárias de MP_{2,5} observadas, nas estações monitoradas, estão apresentadas no **Gráfico 2**.

Observa-se no **Gráfico 2** que o perfil diário de MP_{2,5}, nas quatro estações monitoradas, é muito semelhante, com aumento significativo no período de maio a setembro, quando as condições meteorológicas são mais desfavoráveis à dispersão de poluentes, devido à maior ocorrência de calmarias por várias horas, inversões térmicas mais próximas da superfície e uma menor precipitação pluviométrica.

Gráfico 2 – Perfil das concentrações diárias de $MP_{2,5}$ – 2017

Fonte: CETESB (2020)

As concentrações diárias de MP_{10} , observadas nas estações monitoradas, estão apresentadas no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Perfil das concentrações diárias de MP_{10} , por estação – 2017

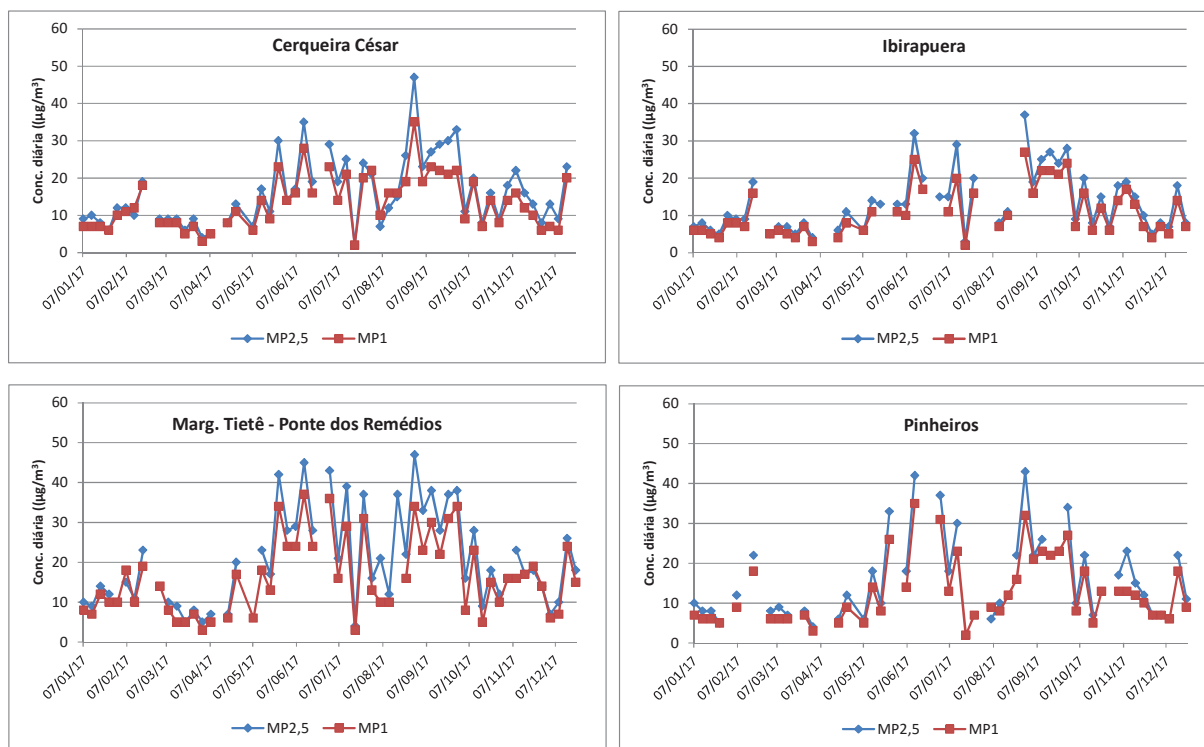
Fonte: CETESB (2020)

As maiores concentrações para o MP₁ foram observadas na estação Marg. Tietê–Ponte dos Remédios sendo também o período de maio a setembro o que apresentou os maiores valores.

O comportamento das concentrações diárias de MP_{2,5} em relação ao MP₁ está apresentado no **Gráfico 4** para cada estação individualmente.

Observa-se no **Gráfico 4** que as concentrações de MP₁ são menores e apresentam os mesmos perfis que as concentrações de MP_{2,5}, nas quatro estações monitoradas, conforme esperado.

Gráfico 4 – Perfil das concentrações diárias de MP_{2,5} e MP₁, por estação monitorada



Fonte: CETESB (2020)

A **Tabela 3** mostra a relação entre M₁ e MP_{2,5} nas quatro estações onde verifica-se que, em média, o MP₁ contribui em cerca de 80% para o MP_{2,5}.

Tabela 3 – Razão MP₁/MP_{2,5} e o desvio padrão nas estações monitoradas

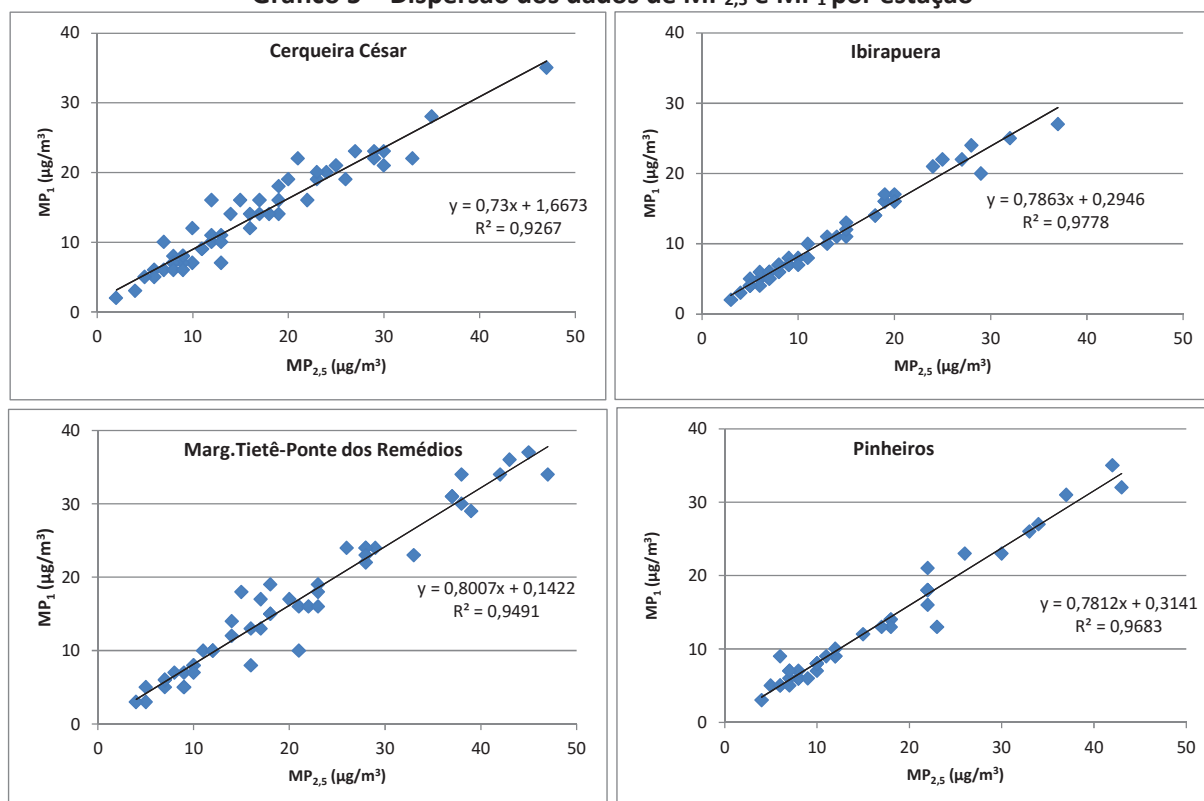
Razão %	Cerqueira César	Ibirapuera	Marg. Tiete – Pte dos Remédios	Pinheiros
MP ₁ /MP _{2,5}	83 ± 10	81 ± 7	79 ± 11	80 ± 9

Fonte: CETESB (2020)

Em estudos recentes realizados por Lang (2018) e Zhang (2018a) em Shijiazhuang e Beijing, respectivamente, foram observadas razões de MP₁/MP_{2,5} da ordem de 75%, indicando o importante papel que o MP₁ tem no MP_{2,5}. Estudo realizado por Yang (2019) em três grandes cidades no nordeste da China, altamente industrializadas, mostraram que a razão MP₁/MP_{2,5} variou de 77% a 87%, ressaltando que a maior parte do MP_{2,5} é composta por MP₁. Ainda segundo esses estudos, o MP₁ é originado, quase totalmente, de processos de combustão e de partículas secundárias, como sulfatos e nitratos, enquanto o MP_{2,5} pode ser formado tanto por processos de combustão quanto por processos mecânicos, como ressuspensão de poeira. Além de verificar a média das porcentagens de MP₁ em

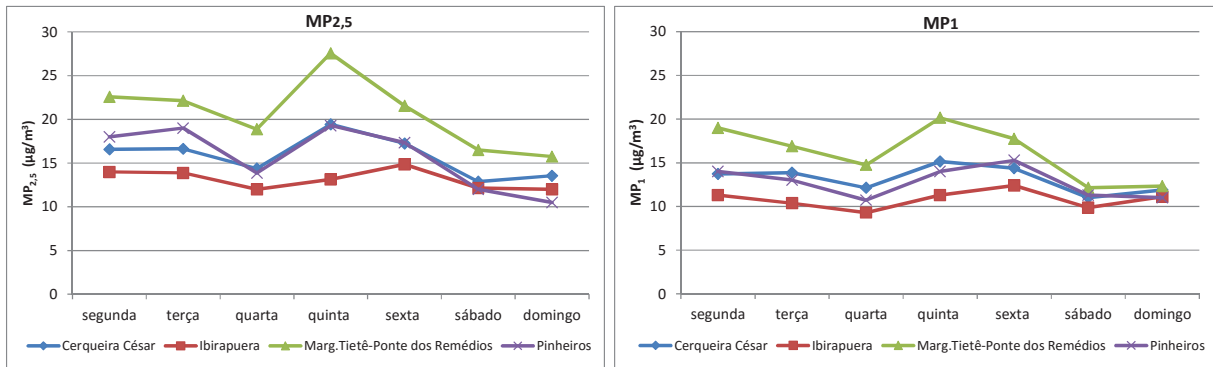
relação ao $MP_{2,5}$, é importante verificar o quanto essa relação se mantém. Para tal, são apresentadas no **Gráfico 5** as dispersões dos dados de $MP_{2,5}$ e MP_1 , por estação monitorada. Observa-se que há forte correlação (R acima de 0,95) entre $MP_{2,5}$ e MP_1 , nas quatro estações, principalmente se tratando de dados ambientais. Além de serem também bastante consistentes já que ocorrem em todas as estações. Isso sugere, a exemplo do encontrado na literatura, que a composição do $MP_{2,5}$ e MP_1 é bastante similar.

Gráfico 5 – Dispersão dos dados de $MP_{2,5}$ e MP_1 por estação



Fonte: CETESB (2020)

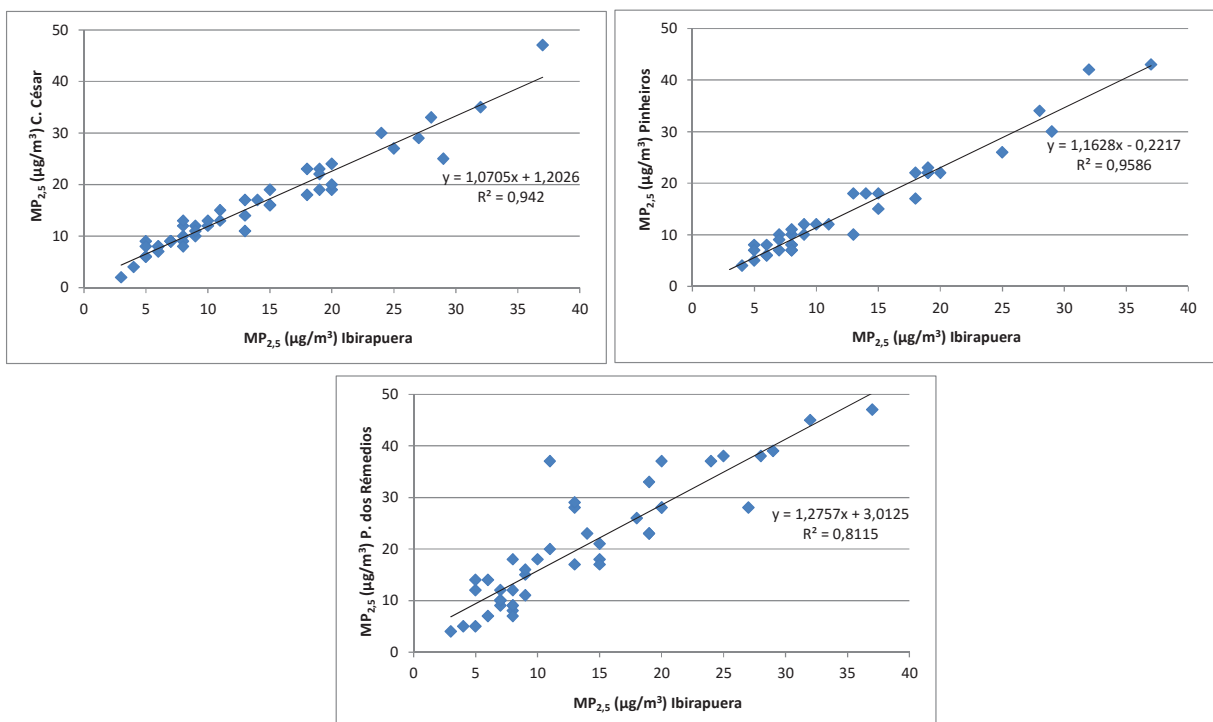
A fim de verificar a variabilidade dos dados em relação aos dias da semana foi elaborado um gráfico para mostrar o perfil das médias diárias de $MP_{2,5}$ e MP_1 por dia da semana, para cada uma das estações (**Gráfico 6**). Pode-se observar que há um aumento nas médias diárias de $MP_{2,5}$ e MP_1 às quintas-feiras, exceto na estação Ibirapuera, e uma queda dos valores aos finais de semana, quando ocorre uma redução no tráfego urbano e consequentemente na emissão veicular. As diferenças de concentração observadas nos dias úteis e no final de semana são mais acentuadas nas estações próximas às vias de tráfego, com destaque para a estação da Marginal Tietê-Ponte dos Remédios e pouco significativas na estação do Ibirapuera, que está mais distante das fontes veiculares havendo, portanto, maior diluição dessas emissões, sendo as variações menos perceptíveis.

Gráfico 6 – Concentrações médias de MP_{2,5} e MP₁ por dia da semana

Fonte: CETESB (2020)

Visando verificar o comportamento do MP_{2,5} e MP₁ em toda a região, tomou-se como referência a estação do Ibirapuera, pois foi a que mostrou menor influência direta das vias de tráfego.

A correlação dos dados de MP_{2,5} dessa estação, em função das demais estações monitoradas estão apresentadas no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Correlação das concentrações diárias de MP_{2,5} do Ibirapuera em função das demais estações

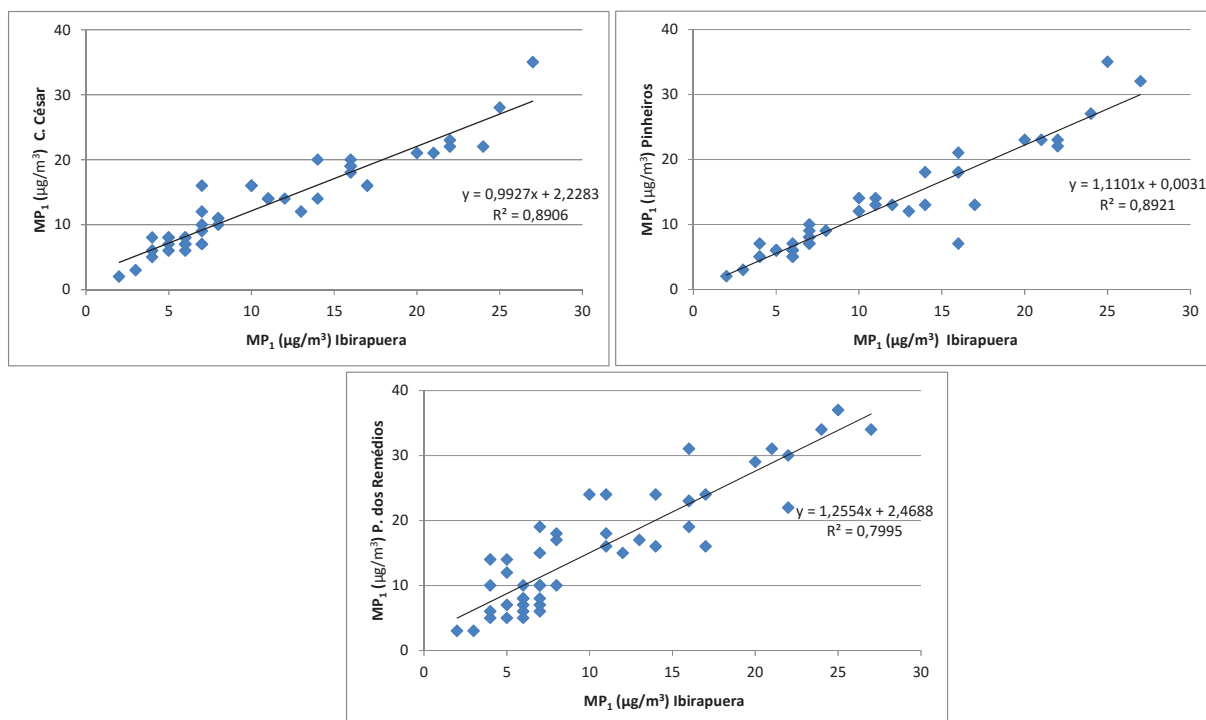
Fonte: CETESB (2020)

Observa-se que há uma correlação muito forte entre o MP_{2,5} obtido na estação Ibirapuera com os dados de MP_{2,5} de Pinheiros e Cerqueira César, mesmo essas estações apresentando tráfego intenso de veículos leves e pesados (ônibus) sugerindo que, no entorno dessas estações, as fontes de material particulado fino são similares. Já a correlação obtida entre o MP_{2,5} observado na estação Ibirapuera com a estação Marg. Tietê-Ponte dos Remédios não foi tão forte, quanto as demais, apesar desta

estação também apresentar tráfego intenso, mas com um perfil diferente de Pinheiros e Cerqueira César, possuindo um fluxo maior e mais rápido de veículos leves e pesados (caminhões).

O **Gráfico 8** apresenta a correlação dos dados de MP_1 do Ibirapuera em função das demais estações monitoradas.

Gráfico 8 – Dispersão das concentrações diárias de MP_1 do Ibirapuera em função das demais estações



Fonte: CETESB (2020)

Da mesma forma como observado no caso do $MP_{2,5}$, as correlações obtidas foram muito fortes entre o MP_1 da estação Ibirapuera com os dados de MP_1 de Pinheiros e Cerqueira César e forte entre o MP_1 da estação Ibirapuera e a estação Marg. Tietê-Ponte dos Remédios.

6 Comparação com dados ambientais de outros locais

A **Tabela 4** traz uma comparação dos resultados obtidos neste estudo com valores obtidos em áreas urbanas de algumas cidades ao redor do mundo, em que pese a comparação dos resultados seja complexa uma vez que foram utilizadas diferentes condições, como métodos de amostragem e análise, limites de detecção e diferentes períodos.

Na **Tabela 4**, são apresentadas as médias obtidas para $MP_{2,5}$ e MP_1 em diferentes cidades. Foram utilizados para comparação apenas os estudos que apresentaram dados tanto de $MP_{2,5}$ quanto MP_1 . Nessa tabela, incluiu-se a razão $MP_1/MP_{2,5}$ obtida utilizando-se os valores médios apresentados nas diferentes cidades.

Observa-se que as médias de concentração obtidas neste estudo, nas duas frações, foram inferiores às obtidas em outras localidades ao redor do mundo, embora em alguns locais, como Barcelona e Atenas, o monitoramento tenha sido realizado há mais de 10 anos.

Na **Tabela 4**, foram observadas razões de $MP_1/MP_{2,5}$ variando da ordem de 70% a 80%, a exceção de Istambul, corroborando os dados obtidos neste estudo.

Tabela 4 – Médias de $MP_{2,5}$ e MP_1 obtidos em diferentes localidades

Local	Período	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		$MP_1/MP_{2,5}$ (%)	Referência
		$MP_{2,5}$	MP_1		
Cerqueira César	2017	16	13	83	estudo atual
Ibirapuera	2017	13	11	81	estudo atual
Marg. Tietê – Pte dos Remédios	2017	21	16	79	estudo atual
Pinheiros	2017	16	13	80	estudo atual
Beijing, CHN	2017	95,5	78,2	81	(ZHANG, 2018)
Shijiazhuang, CHN	2016	91,7	70,5	77	(LANG, 2018)
Istambul, TUR	2009-2010	40,5	22,1	55	(ONAT, 2012)
Liaoning, CHN	2006-2008	82	66,9	82	(YANG, 2019)
Barcelona, ESP	2007	25	17	68	(PÉREZ, 2010)
Atenas, GRE	2005-2006	29	20	69	(THEODOSI, 2011)
Hong Kong, HKG	2004	52,3	35,9	69	(LEE, 2006)

Fonte: CETESB (2020)

7 Conclusões

Com relação ao monitoramento de $MP_{2,5}$ e MP_1 realizado no município de São Paulo, mais especificamente nas estações Cerqueira César, Pinheiros, Ibirapuera e Marg. Tietê–Ponte dos Remédios, em 2017, pode-se concluir que:

- o padrão diário ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de qualidade do ar, no caso do $MP_{2,5}$, não foi ultrapassado em nenhuma das estações monitoradas, mas o padrão anual ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi ultrapassado na estação Marg. Tietê-Ponte dos Remédios;
- a estação Marg. Tietê-Ponte dos Remédios foi a que apresentou maior variabilidade dos dados enquanto que a estação Ibirapuera foi a que apresentou a menor variabilidade, tanto para $MP_{2,5}$ quanto para MP_1 ;
- o perfil diário das concentrações, tanto de $MP_{2,5}$ como de MP_1 por estação, é muito semelhante, com aumento significativo no período de maio a setembro, quando as condições meteorológicas são mais desfavoráveis à dispersão de poluentes;
- a razão $MP_1/MP_{2,5}$ indicou que, em média, o MP_1 contribui em cerca de 80% para o $MP_{2,5}$, indicando o importante papel que o MP_1 tem no $MP_{2,5}$;
- o perfil diário das concentrações de $MP_{2,5}$ em relação ao MP_1 , por estação, é muito semelhante;
- o perfil por dia da semana mostrou haver um aumento nas médias diárias de $MP_{2,5}$ e MP_1 às quintas-feiras e uma redução dos valores aos finais de semana, quando ocorre uma redução no tráfego urbano e conseqüentemente na emissão veicular;
- houve correlação muito forte dos dados tanto de $MP_{2,5}$ como de MP_1 da estação Ibirapuera, em relação aos dados correspondentes das estações Pinheiros e Cerqueira César, sugerindo que no entorno dessas estações as fontes de material particulado são similares;
- a correlação dos dados de $MP_{2,5}$ da estação Ibirapuera, em relação ao $MP_{2,5}$ da estação Marg. Tietê-Ponte dos Remédios não foi tão forte, provavelmente devido à presença de caminhões, o que difere dos outros locais monitorados;
- a comparação dos resultados deste estudo com valores de outras localidades ao redor do mundo mostrou que as médias de concentrações aqui obtidas nas duas frações, foram inferiores às das outras cidades;
- as razões $MP_1/MP_{2,5}$ em outras localidades variaram entre 70% e 80%, semelhantes aos dados obtidos no município de São Paulo.

Em continuidade a este estudo, de comparação do $MP_{2,5}$ e MP_1 , serão realizadas

- análises por espectrometria de raios-X para especificação do material particulado com foco nos metais pesados, por serem estes prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente;
- análises por cromatografia líquida para determinação de nitratos e sulfatos que são provenientes do material particulado secundário importante componente da fração fina;
- monitoramento de $MP_{2,5}$ e MP_1 na Região Metropolitana de São Paulo.

Referências

- BRASIL. CONAMA. Resolução CONAMA nº 491/2018, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre qualidade do ar. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 21 nov. 2018. Seção 1, p. 155-156. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>>. Acesso em: dez.2019.
- CETESB. **Caracterização das Estações da Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar na RMSP: Estação Ibirapuera**. São Paulo, 2004. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>>. Acesso em: dez.2019.
- CETESB. **Classificação da representatividade espacial das estações de monitoramento da qualidade do ar**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>>. Acesso em: dez.2019.
- CETESB. **Caracterização das Estações da Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar na RMSP: Estação Cerqueira César**. São Paulo, 2005. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>>. Acesso em: dez.2019.
- CHO S.-H., TONG H., MCGEE J., BALDAUF R., KRANTZ Q., GILMOUR M. Comparative toxicity of size-fractionated airborne particulate matter collected at different distances from an urban highway. **Environ. Health Perspect.** 2009, 10.1289/ehp.0900730.
- DIOCIAIUTI M, BALDUZZI M, DE BERARDIS B, CATTANI G, STACCHINI G, ZIEMACKI G, MARCONI A, PAOLETTI L The two PM_{2.5} (fine) and PM_(2.5-10) (coarse) fractions: evidence of different biological activity. **Environ Res.**, v. 86, 254–262 (2001).
- IZHAR, S.; GOEL, A.; CHAKRABORTY, A.; GUPTA, T. Annual trends in occurrence of submicron particles in ambient air and health risk posed by particle bound metals. **Chemosphere**, 146, 582-590, 2016
- KLEJNOWSKI, K., PASTUSZKA, J.S., ROGULA-KOZŁOWSKA, W.; TALIK E.; KRASA A.. Mass Size Distribution and Chemical Composition of the Surface Layer of Summer and Winter Airborne Particles in Zabrze, Poland. **Bull Environ. Contam. Toxicol.**, 88, 255–259 (2012) doi:10.1007/s00128-011-0452-3.
- LANG, J.; LI, S.; CHENG, S.; ZHOU, Y.; CHEN, D.; ZHANG, Y.; ZHANG, H.; WANG, H. Chemical Characteristics and Sources of Submicron Particles in a City with Heavy Pollution in China. **Atmosphere**, 9, 388, 2018.
- LEE, S. C.; CHENG, Y.; HO, K. F.; CAO, J. J.; LOUIE, P. K.-K.; CHOW, J. C.; WATSON, J. G. PM_{1.0} and PM_{2.5} Characteristics in the Roadside Environment of Hong Kong. **Aerosol Science and Technology**, 40:3, 157-165, 2006 DOI: 10.1080/02786820500494544.
- ONAT, B.; SAHIN, U.A.; AKYUZ, T. - Elemental characterization of PM_{2.5} and PM₁ in dense traffic area in Istanbul, Turkey. **Atmospheric Pollution Research**, v.4, n. 1, 101-105, 2013.
- PÉREZ, N.; PEY, J.; CUSACK M.; RECHE, C.; QUEROL, X.; ALASTUEY, A.; VIANA, M. Variability of Particle Number, Black Carbon, and PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ Levels and Speciation: Influence of Road Traffic Emissions on Urban Air Quality. **Aerosol Science and Technology**, 44:7, 487-499, 2010 DOI: 10.1080/02786821003758286.
- POPE, C. A. AND DOCKERY, D. W. Epidemiology of particle effects. In: S. T. Holgate, J. M. Samet, H. S. Koren, R.L. Maynard (eds.). **Air Pollution and Health**, San Diego: Academic Press, pp. 673–705. 1999.
- SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 8468, de 8 de setembro de 1976**. Aprova Regulamento que disciplina a execução da Lei n. 997, de 31/05/1976, que dispõe sobre controle da poluição do meio ambiente. Com alterações posteriores. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/norma/?id=62153>>. Acesso em: dez.2019.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 59.113, de 23 de abril de 2013**. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Com retificações posteriores. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>>. Acesso em: dez.2019.

THEODOSI, C.; GRIVAS, G.; ZARMPAS, P.; CHALOULAKOU, A.; MIHALOPOULOS, N. Mass and chemical composition of size-segregated aerosols (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀) over Athens, Greece: local versus regional sources, **Atmos. Chem. Phys.**, 11, 11895–11911, 2011.

WICHMANN, H.-E.; BROWN, L. M.; COLLINGS, N.; HARRISON, R. M.; MAYNARD, A. D.; MAYNARD, R. L.; PETERS, A. Epidemiological evidence of the effects of ultrafine particle exposure 358 *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 2000 <http://doi.org/10.1098/rsta.2000.0682>.

Wichmann H-E.; Kappos, A.; Bruckmann, P.; Eikmann, T.; Englert, N.; Heinrich, U.; Höpfe, P.; Koch, E.; Krause, G.; Kreyling, W.; Rauchfuss, K.; eter Rombout, Verena Schulz-Klemp, Thiel, W. Health effects of particles in ambient air. **Int J Hyg Environ Health** 207:399–407 (2004).

Zhang, Y.; Lang, J.; Cheng, S.; Li, S.; Zhou, Y.; Chen, D.; Zhang, H.; Wang, H. Chemical composition and sources of PM₁ and PM_{2.5} in Beijing in autumn, **Science of the Total Environment** v.630, pp.72-82, 2018a.

Apêndice






Data de Amostragem	Cerqueira César ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Ibirapuera ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Marg.Tietê-Ponte dos Remédios ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Pinheiros ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	MP2,5	MP1	MP2,5	MP1	MP2,5	MP1	MP2,5	MP1
07-jan-17	9	7	7	6	10	8	10	7
13-jan-17	10	7	8	6	9	7	8	6
19-jan-17	8	7	6	5	14	12	8	6
25-jan-17	6	6	5	4	12	10	5	5
31-jan-17	12	10	10	8		10		
06-fev-17	12	11	9	8	15	18	12	9
12-fev-17	10	12	9	7	11	10		
18-fev-17	19	18	19	16	23	19	22	18
02-mar-17	9	8	5	5		14	8	6
08-mar-17	9	8	7	6	10	8	9	6
14-mar-17	9	8	7	5	9	5	7	6
20-mar-17	6	5	5	4	5	5		
26-mar-17	9	7	8	7	8	7	8	7
01-abr-17	4	3	4	3	5	3	4	3
07-abr-17	5	5			7	5		
19-abr-17	8	8	6	4	7	6	6	5
25-abr-17	13	11	11	8	20	17	12	9
07-mai-17	7	6	6	6		6	6	5
13-mai-17	17	14	14	11	23	18	18	14
19-mai-17	11	9	13		17	13	10	8
25-mai-17	30	23			42	34	33	26
31-mai-17	14	14	13	11	28	24		
06-jun-17	17	16	13	10	29	24	18	14
12-jun-17	35	28	32	25	45	37	42	35
18-jun-17	19	16	20	17	28	24		
30-jun-17	29	23	15		43	36	37	31
06-jul-17	19	14	15	11	21	16	18	13
12-jul-17	25	21	29	20	39	29	30	23
18-jul-17	2	2	3	2	4	3		2
24-jul-17	24	20	20	16	37	31		7
30-jul-17	21	22			16	13	16	22
05-ago-17	7	10			21	10	6	9
11-ago-17	12	16	8	7	12	10	10	8
17-ago-17	15	16	11	10	37			12
23-ago-17	26	19			22			16
29-ago-17	47	35	37	27	47	34	43	32
04-set-17	23	19	19	16	33	23	22	21
10-set-17	27	23	25	22	38	30	26	23
16-set-17	29	22	27	22	28	22		22
22-set-17	30	21	24	21	37	31		23
28-set-17	33	22	28	24	38	34	34	27
04-out-17	11	9	9	7	16	8	10	8
10-out-17	20	19	20	16	28	23	22	18
16-out-17	8	7	8	6	9	5	7	5
22-out-17	16	14	15	12	18	15		13
28-out-17	9	8	7	6	12	10		
03-nov-17	18	14	18	14		16	17	13
09-nov-17	22	16	19	17	23	16	23	13
15-nov-17	16	12	15	13	17	17	15	12
21-nov-17	13	10	10	7	18	19	12	10
27-nov-17	8	6	5	4	14	14	7	7
03-dez-17	13	7	8	7	7	6	7	7
09-dez-17	9	6	7	5	10	7		6
15-dez-17	23	20	18	14	26	24	22	18
21-dez-17			8	7	18	15	11	9

Fonte: CETESB (2020)



| Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente

Acompanhe as redes sociais da CETESB:

-  Site: cetesb.sp.gov.br
-  Facebook: facebook.com/cetesbsp
-  LinkedIn: linkedin.com/company/cetesb
-  Instagram: instagram.com/cetesbsp
-  SoundCloud: soundcloud.com/cetesbsp

ISBN 978-65-5577-008-7