

Artigo Técnico

Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP_{2,5}) em Belo Horizonte, MG

Evaluation of meteorological conditions influence on fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration in Belo Horizonte, MG, Brazil

Fábio Soares dos Santos^{1*} , Janaina Antonino Pinto¹ , Felipe Marinho Maciel¹ , Frederico Silva Horta¹ , Taciana Toledo de Almeida Albuquerque¹ , Maria de Fátima Andrade² 

RESUMO

O agravamento da poluição atmosférica nos centros urbanos devido ao crescimento das instalações industriais e da frota veicular é um problema que causa danos ambientais, afetando também a saúde humana, principalmente pela inalação de material particulado fino (MP_{2,5}). O objetivo deste estudo foi avaliar a influência das condições meteorológicas na concentração de MP_{2,5} em Belo Horizonte, utilizando dados amostrados entre o inverno de 2007 e o outono de 2008. Além disso, foram avaliadas as diferenças dos dados meteorológicos e da concentração do MP_{2,5} entre as estações do ano nesse período. Para tanto, foram realizados testes estatísticos de correlação entre os dados meteorológicos e a concentração de MP_{2,5}, além de análises de significância para avaliação das diferenças entre esses dois parâmetros nos períodos seco e chuvoso, característicos da área de estudo. Foi observada diferença significativa entre a concentração do MP_{2,5} nos períodos seco e chuvoso. Foram também observadas diferenças significativas entre os parâmetros meteorológicos (umidade relativa; temperatura mínima, média e máxima; e direção do vento) para esses períodos. Por meio da análise de correlação de Spearman, observou-se correlação significativa entre a concentração do MP_{2,5} e os parâmetros meteorológicos precipitação e umidade relativa do ar.

Palavras-chave: qualidade do ar; condições meteorológicas; material particulado; MP_{2,5}; Belo Horizonte.

ABSTRACT

The increase of air pollution in urban centres due to the growth of industrial facilities and vehicular fleet is a problem that causes environmental damage and affects human health, mainly due to the inhalation of fine particulate matter (PM_{2.5}). For this reason, the aim of this study was to evaluate the influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentration in Belo Horizonte, using data sampled from the winter of 2007 to the autumn of 2008. In addition, the differences in meteorological data and PM_{2.5} concentration between the seasons of the year in this study's period were also assessed. For this, correlation statistical tests were performed for meteorological data and PM_{2.5} concentration, as well as significance analysis to evaluate the differences between these two parameters in the dry and wet periods, characteristic of the study area. It was observed a significant difference between PM_{2.5} concentration in dry and wet periods. Significant differences were also observed between meteorological parameters (relative humidity, minimum, mean and maximum temperature and wind direction) for these periods. Spearman's correlation analysis showed a significant correlation between PM_{2.5} concentration and the meteorological parameters precipitation and relative humidity.

Keywords: air quality; meteorological conditions; particulate matter; PM_{2.5}; Belo Horizonte

INTRODUÇÃO

O aumento da poluição atmosférica urbana por causa da instalação de indústrias próximas às grandes cidades e do crescimento da quantidade de automóveis circulando nos centros urbanos é um grande problema ambiental. De acordo com a Resolução do Conselho Nacional

do Meio Ambiente (CONAMA) n° 3/1990 (BRASIL, 1990), a poluição atmosférica é definida como qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, concentração, tempo ou características que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora

¹Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte (MG), Brasil.

²Universidade de São Paulo - São Paulo (SP), Brasil.

*Autor correspondente: fabiosoaes04@gmail.com

Recebido: 02/01/2017 - Aceito: 03/07/2018 - Reg. ABES: 174045

ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e à qualidade de vida da comunidade.

A cidade de Belo Horizonte, capital do Estado de Minas Gerais, vem apresentando aumento da poluição atmosférica, uma vez que se encontra altamente urbanizada e sofre com a interferência das atividades desenvolvidas em sua região metropolitana. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), em censo realizado no ano de 2010 a população de Belo Horizonte era de 2.375.151 habitantes, com densidade demográfica de 7.167 habitantes/km² e frota veicular total de 1.332.381 veículos.

Nas áreas urbanas, diversos poluentes atmosféricos podem ser observados, destacando-se os gases óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV) e o material particulado primário carbonáceo e não carbonáceo (VALLERO, 2014).

O interesse científico por partículas na atmosfera está relacionado a seus efeitos sobre o clima, o meio ambiente, a visibilidade e ao risco à saúde humana. Conceitualmente, material particulado (MP) atmosférico são as partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, que podem ser originárias de fontes naturais, como a ressuspensão de poeira do solo que sofre ação do vento, ou de atividades antropogênicas, como a queima de combustíveis fósseis. Partículas com diâmetro aerodinâmico (d_a) menor que 2,5 µm são consideradas material particulado fino (MP_{2,5}) e aquelas com d_a entre 2,5 e 10 µm constituem o material particulado grosso (ALBUQUERQUE, 2005).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2016), 92% da população mundial vive em locais onde os níveis de qualidade do ar excedem as diretrizes para a média anual de partículas com diâmetro inferior a 2,5 micrômetros (MP_{2,5}), cujo valor máximo é de 10 µg.m⁻³. Para a média de 24 horas, a OMS define o valor de 25 µg.m⁻³. O MP_{2,5} inclui poluentes como sulfato e nitrato, que penetram profundamente nos pulmões e no sistema cardiovascular, colocando a saúde humana em risco.

É importante ressaltar que, no Brasil, os padrões de qualidade do ar são estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990) e divididos em padrões primários e secundários. Os padrões primários se referem às concentrações de poluentes que, se ultrapassadas, podem afetar a saúde da população. Já os padrões secundários são as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como mínimo dano à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. O padrão secundário se refere aos níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo.

Para as partículas inaláveis (material particulado grosso — MP₁₀), a Resolução CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990) estabelece os seguintes padrões:

- Padrão primário: concentração média aritmética anual de 50 µg.m⁻³;
- Padrão secundário: concentração média de 24 horas de 150 µg.m⁻³, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

Não existe padrão nacional para as partículas finas (MP_{2,5}), fração que acarreta riscos e impactos específicos na atmosfera. Essas partículas estão associadas a problemas de saúde, pois podem penetrar no trato respiratório e se depositar na região pulmonar, causando diversas doenças (USEPA, 2016).

O comportamento da concentração desse material na atmosfera está relacionado, além das suas fontes de emissão e geração, a diversos fatores da complexa dinâmica atmosférica. Entre os principais mecanismos de remoção e redução da concentração de material particulado na atmosfera estão processos físicos como a dispersão e deposição seca e úmida (PRODI & TAMPIERI, 1982), cuja ação pode sofrer grande influência dos parâmetros meteorológicos.

É entendido que a avaliação isolada dos parâmetros meteorológicos talvez simplifique a compreensão dos processos físico-químicos que influenciam na distribuição espaço-temporal desses poluentes atmosféricos. Contudo, ainda que isolado, o estudo das interações entre cada parâmetro meteorológico e os dados de qualidade do ar poderia trazer respostas sobre os diferentes perfis de distribuição e comportamento dos poluentes em diferentes épocas do ano (ELMINIR, 2005; KATSOLIS, 1996).

Diante do cenário exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência das condições meteorológicas na concentração de MP_{2,5} em Belo Horizonte, utilizando dados amostrados entre o inverno de 2007 e o outono de 2008. Além disso, foram avaliadas as diferenças dos dados meteorológicos e da concentração do MP_{2,5} entre as estações do ano nesse período de estudo.

METODOLOGIA

Campanhas amostrais para o monitoramento e a avaliação da concentração de material particulado em Belo Horizonte

O MP_{2,5} foi coletado em campanha amostral realizada entre 2007 e 2008 por Andrade *et al.* (2012) e Miranda *et al.* (2012) em seis capitais brasileiras, entre elas Belo Horizonte.

No período de amostragem, foram coletadas amostras de partículas por períodos de 24 horas, usando um Harvard Impactor, equipamento desenvolvido na *Harvard School of Public Health*. O dispositivo foi equipado com filtros de policarbonato de 37 mm (0,8 µm de tamanho de poro) para coleta do MP_{2,5}. O aparelho de amostragem era composto de uma bomba de vácuo com sistema para controlar e regular a taxa de fluxo (10 L.min⁻¹), um cronômetro e um pêndulo que permitia a coleta de material com d_a inferior a 2,5 µm. Após a coleta do material, análises gravimétricas foram realizadas para determinar a concentração mássica de MP_{2,5} nos filtros de amostragem (ANDRADE *et al.*, 2012; MIRANDA *et al.*, 2012).

Dados meteorológicos

Para melhor entendimento da qualidade do ar em Belo Horizonte entre os anos de 2007 e 2008, foi necessária a coleta de dados meteorológicos. Para

isso, foi utilizada como referência a estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Estação 83587), localizada na Avenida do Contorno, nº 8.159, no bairro de Santo Agostinho, Belo Horizonte. Essa estação foi escolhida por ser a mais próxima da área de monitoramento do material particulado. Assim, foram coletados dados diários médios dos parâmetros precipitação, temperatura mínima, máxima e média, umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento. Além disso, foram obtidos dados de direção do vento para os horários das 00, 12 e 18h UTC, pelo fato de o instituto não fornecer suas médias diárias. Os dados foram coletados durante o período de um ano, contado a partir de 21 de junho de 2007 (início do inverno) até 20 de junho de 2008 (fim do outono), e encontram-se disponíveis na plataforma de dados do INMET (2016).

Estatística descritiva

Para os dados de $MP_{2,5}$ e os meteorológicos, que possuem médias diárias como precipitação, temperatura mínima, máxima e média, UR e velocidade do vento, foram calculados os seguintes parâmetros para a avaliação da estatística descritiva: média, média geométrica, moda, mediana, percentis 25 e 75%, valores máximos e mínimos, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria. Cabe dizer que todos os procedimentos estatísticos foram feitos separando-se os dados nos períodos caracterizados como seco (outono e inverno) e chuvoso (primavera e verão), de acordo com as normais climatológicas (1961–1990) para o município de Belo Horizonte (RAMOS *et al.*, 2009). Essa escolha foi feita porque os dados climáticos para os anos de 2007 e 2008 seguiram perfil muito semelhante

ao daqueles referenciados nas normais climatológicas, como pode ser verificado na Figura 1. Ademais, para esses dados também foram elaborados seus histogramas de distribuição de frequência, assim como os *boxplot*.

Verificação da normalidade dos dados

A verificação da normalidade dos dados é uma etapa importante que deve ser realizada antes da aplicação dos testes estatísticos. A análise dos resultados observados nessa etapa definiu os melhores testes estatísticos a serem aplicados, tais como os paramétricos ou não paramétricos. Assim, para avaliar se os dados ambientais obtidos neste estudo seguem ou não perfil de distribuição normal, complementarmente à estatística descritiva, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk. A interpretação desse teste foi feita juntamente com a análise gráfica do Normal Probability Plot. Todos esses procedimentos foram realizados no *software* STATISTICA 10.0.

Verificação da existência de diferenças significativas quanto à concentração de material particulado e parâmetros meteorológicos nos períodos seco e chuvoso

Com o objetivo de avaliar qual período — seco ou chuvoso — poderia trazer mais problemas à saúde da população quanto à ocorrência de material particulado fino na atmosfera, procedeu-se à análise estatística para os valores de tendência central das amostras de concentração de $MP_{2,5}$ desses dois períodos de referência. O mesmo procedimento foi utilizado para a avaliação dos parâmetros meteorológicos.

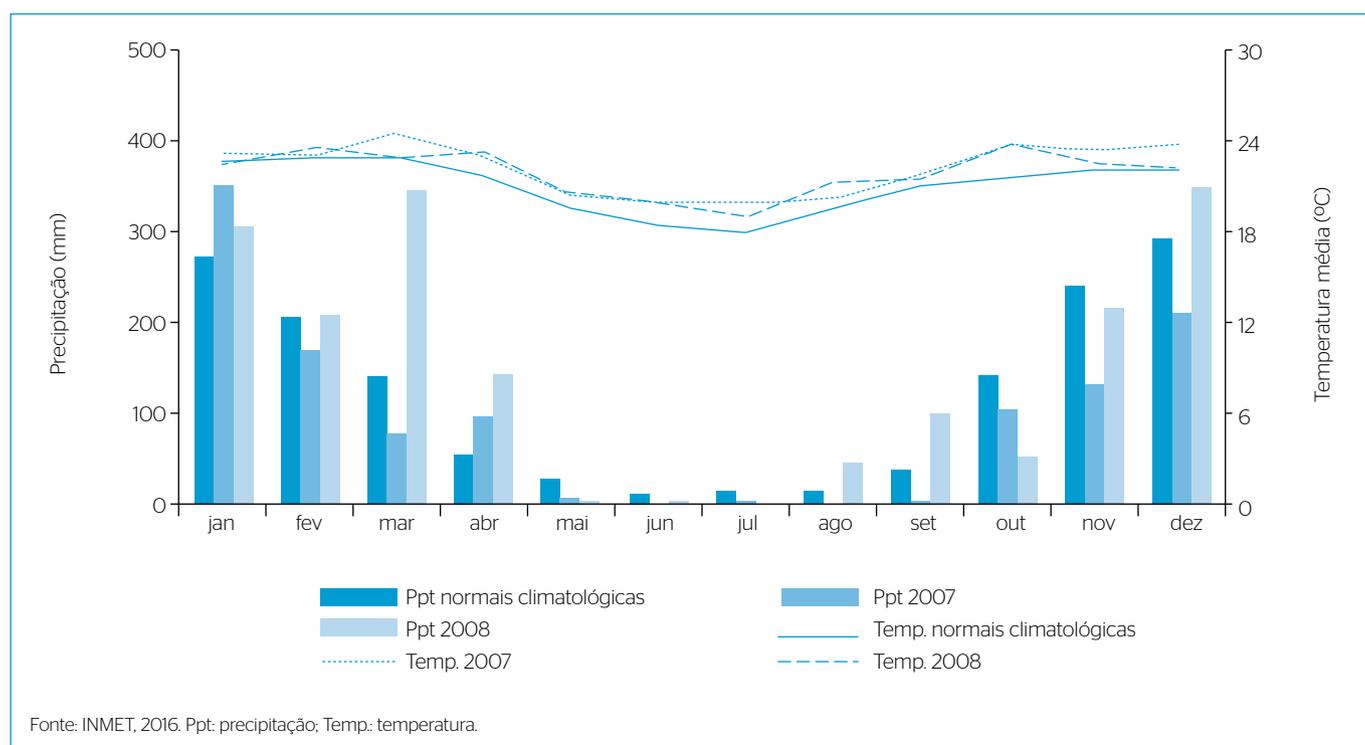


Figura 1 - Climograma para Belo Horizonte.

A escolha do melhor teste estatístico para essa comparação foi feita com base nos resultados obtidos nos testes de normalidade. Assim, para os casos em que o resultado do teste de normalidade demonstrou que o conjunto de dados segue distribuição normal, foi realizado o Teste *t* de variância combinada para a comparação entre as médias de duas amostras independentes, ou seja, um teste paramétrico. Para os dados que não seguiram distribuição normal, foi adotado um teste equivalente não paramétrico, o teste U de Mann-Whitney, para a comparação entre as medianas de duas amostras independentes. Essa comparação também foi feita com auxílio do *software* STATISTICA 10.0.

Correlação entre os dados de material particulado e alguns parâmetros meteorológicos

Considerando-se a interferência de parâmetros meteorológicos na distribuição de material particulado em determinada área, buscou-se verificar se existem correlações significativas entre a concentração desse poluente na atmosfera e os parâmetros meteorológicos precipitação, UR, velocidade e direção do vento. Para esse último, devido à indisponibilidade de dados médios diários, adotou-se a direção do vento predominante observada às 12 h. Esses parâmetros são descritos por Katsoulis (1996) como aqueles que mais interferem na distribuição dos poluentes, considerando-se uma área local. Assim, foram determinados os coeficientes de correlação entre cada um desses parâmetros e a concentração de material particulado, seguidos da análise de significância da correlação por meio do teste de hipóteses.

Para a avaliação da correlação, foram selecionados somente os dados meteorológicos referentes aos mesmos dias de monitoramento do $MP_{2,5}$, eliminando-se aqueles utilizados para a caracterização dos

períodos seco e chuvoso de maneira global. Considerando-se as respostas obtidas pela verificação da normalidade dos dados, foram adotadas a correlação linear de Pearson para os dados paramétricos e a avaliação pelo coeficiente de correlação para os postos de Spearman, seguidas do teste de hipóteses para a significância da correlação para os dados não paramétricos. Nesse caso, os procedimentos também foram feitos com auxílio do *software* STATISTICA 10.0.

Regressão linear simples entre dados que apresentaram correlação significativa

Com base nos parâmetros meteorológicos que apresentaram correlação significativa com os dados de material particulado, foram realizadas análises de regressão linear simples, com o intuito de modelar e investigar a relação entre as variáveis. Para isso, foi estabelecida a equação para o modelo linear ajustado aos dados, além de seu coeficiente de determinação e intervalo de predição de valores com 95% de confiança. Esses procedimentos também foram conduzidos com o *software* STATISTICA 10.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estatística descritiva dos dados

Os resultados da estatística descritiva para os dados estudados nos períodos seco e chuvoso podem ser observados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Para ambos os períodos avaliados, os dados meteorológicos de temperatura, UR e velocidade do vento tenderam a uma distribuição

Tabela 1 - Estatística descritiva para o material particulado e os dados meteorológicos no período seco.

Estatísticas	Parâmetros						
	$MP_{2,5}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$)	Precipitação (mm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			UR (%)	Velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
			Mínima	Máxima	Média		
Tamanho da amostra	86	186	186	186	186	186	186
Média	17,692	1,1	17,0	26,7	21,1	56,1	2,1
Média geométrica	16,569	-	16,9	26,6	21,0	55,2	2,0
Moda	-	0,0	16,0	27,4	19,4	56,8	1,8
Mediana	16,654	0,0	16,9	27,0	20,9	55,5	2,0
Percentil 25%	14,027	0,0	15,5	25,1	19,8	50,3	1,6
Percentil 75%	19,759	0,0	18,7	28,4	22,5	62,9	2,6
Máximo	44,521	42,8	21,6	33,4	25,6	85,0	3,5
Mínimo	5,613	0,0	10,6	19,7	14,2	27,3	0,8
Desvio padrão	6,726	5,0	2,1	2,4	2,0	9,9	0,7
Coeficiente de variação	0,380	4,5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3
Coeficiente de curtose	2,867	36,1	-0,2	0,1	0,4	0,6	-0,8
Coeficiente de assimetria	1,352	5,7	0,1	-0,1	-0,2	0,2	0,3

UR: umidade relativa do ar.

normal em razão dos valores nulos ou próximos disso do coeficiente de assimetria. Isso se confirma quando verificada a grande proximidade das medidas de tendência central desses dados (média, moda e mediana).

No entanto, pode-se dizer que os dados de MP_{2,5} e precipitação são positivamente assimétricos, considerando-se os dados do coeficiente de assimetria. Esse fato é ressaltado quando se observa a relação moda < mediana < média. Dessa maneira, pode-se afirmar que esses dados apresentam tendência de distribuição não normal.

Verificação da normalidade dos dados

Complementarmente à análise estatística descritiva, apresentada nas Tabelas 1 e 2, foram realizados os testes de normalidade de Shapiro-Wilk, cujos resultados podem ser observados na Tabela 3 e na Figura 2. Considerando-se que, na estatística para esse teste, a hipótese nula (H_0) é a de que os dados seguem distribuição normal, a mesma é válida caso o valor p observado seja superior ao nível de significância do teste ($\alpha=0,05$). Assim, apesar de, pelos dados da estatística descritiva, somente os dados de MP_{2,5} e de precipitação tenderem a uma distribuição não normal, o teste de Shapiro-Wilk mostra que, além deles, os dados de temperatura mínima, UR e velocidade do vento também não apresentam distribuição normal (Tabela 3).

Em síntese, considerando que o teste de Shapiro-Wilk para normalidade mostrou que apenas os dados de temperatura média e máxima seguem distribuição normal, tendo os outros cinco parâmetros comportamento assimétrico, foram adotados, neste estudo, os testes não paramétricos para a verificação de correlações e a comparação dos dados entre as estações seca e chuvosa.

Verificação de diferenças significativas entre a concentração de material particulado e os parâmetros meteorológicos nos períodos seco e chuvoso

Como descrito na metodologia, e considerando-se os resultados dos testes de normalidade, a verificação de diferenças estatísticas entre os parâmetros estudados nos períodos seco e chuvoso foi feita pelo teste não paramétrico U de Mann-Whitney, com nível de significância de 5%. Os resultados podem ser observados na Tabela 4 e na Figura 2.

Tabela 3 - Resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$) para os dados da concentração de material particulado e os dados meteorológicos avaliados.

Parâmetro	Teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$)		
	Estatística (SW-W)	p	Interpretação
Material particulado	0,8768	0,0000	Não apresenta distribuição normal
Precipitação	0,4189	0,0000	Não apresenta distribuição normal
Temperatura média	0,9930	0,0870	Apresenta distribuição normal
Temperatura mínima	0,9842	0,0005	Não apresenta distribuição normal
Temperatura máxima	0,9970	0,7344	Apresenta distribuição normal
Umidade relativa	0,9881	0,0045	Não apresenta distribuição normal
Velocidade do vento	0,9892	0,0087	Não apresenta distribuição normal

Tabela 2 - Estatística descritiva para o material particulado e os dados meteorológicos no período chuvoso.

Estatísticas	Parâmetros						
	MP _{2,5} ($\mu\text{g}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$)	Precipitação (mm)	Temperatura (°C)			UR (%)	Velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
			Mínima	Máxima	Média		
Tamanho da amostra	64	178	177	177	177	177	178
Média	14,723	7,0	19,7	28,8	23,4	62,8	2,0
Média geométrica	13,323	-	19,6	28,7	23,3	61,3	1,9
Moda	-	0,0	20,1	28,6	23,1	61,3	2,4
Mediana	12,764	0,0	19,7	28,8	23,4	61,8	2,0
Percentil 25%	9,913	0,0	18,7	27,2	22,2	52,5	1,6
Percentil 75%	15,684	8,5	20,7	30,6	24,5	73,8	2,4
Máximo	54,257	94,2	24,8	36,2	28,5	94,3	3,8
Mínimo	5,834	0,0	15,0	20,9	18,5	27,8	0,7
Desvio padrão	7,803	14,5	1,5	2,8	1,9	13,7	0,6
Coeficiente de variação	0,530	2,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3
Coeficiente de curtose	9,418	11,6	0,6	0,3	0,3	-0,5	-0,3
Coeficiente de assimetria	2,503	3,1	0,0	-0,2	0,1	0,0	0,1

UR: umidade relativa do ar.

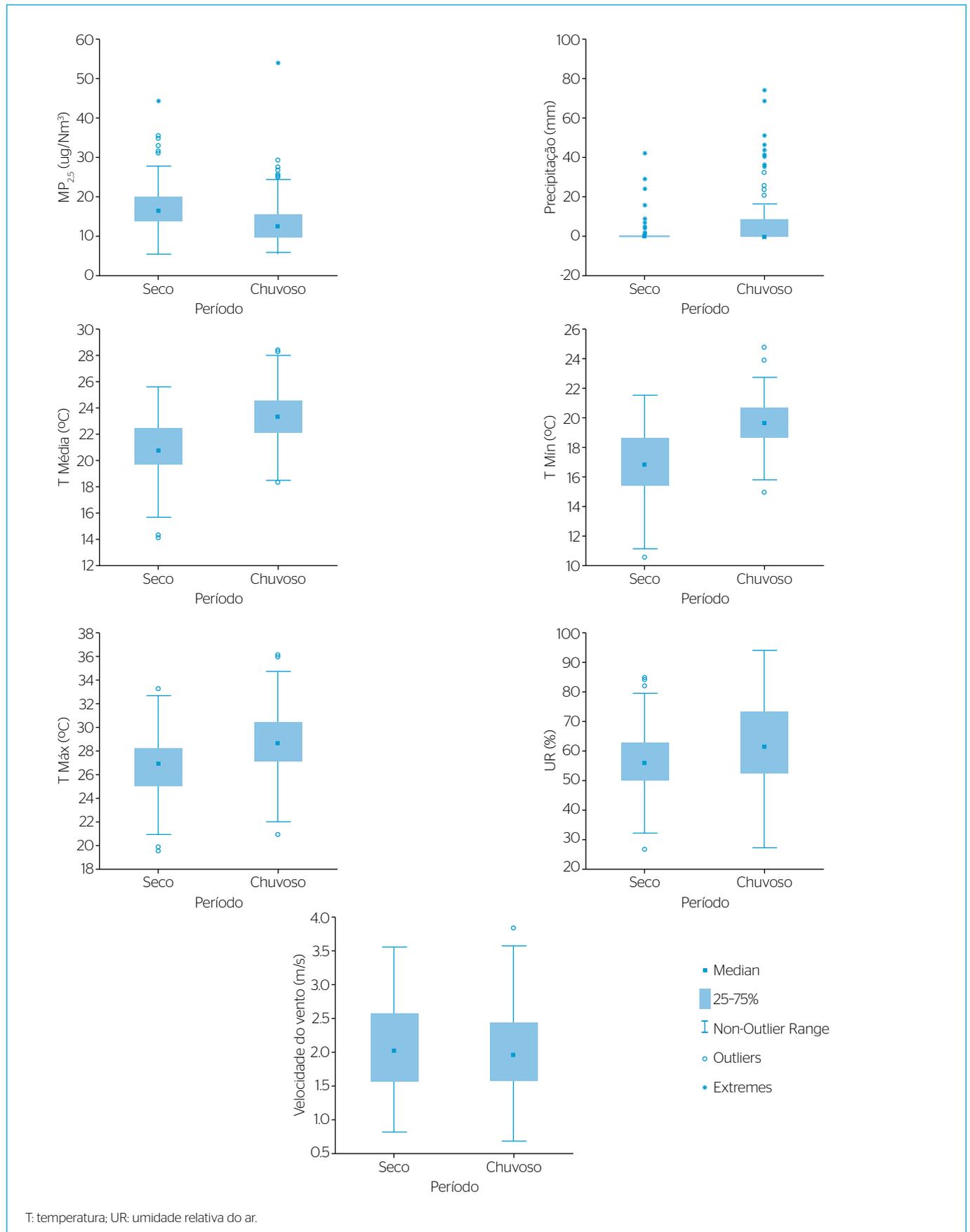


Figura 2 - Gráficos *boxplot* para os parâmetros avaliados: (A) material particulado; (B) precipitação; (C) temperatura média; (D) temperatura mínima; (E) temperatura máxima; (F) umidade relativa do ar; (G) velocidade do vento.

Assim, para o MP_{2,5}, nota-se que a mediana da concentração no período seco (16,654 µg.N⁻¹m⁻³) foi significativamente maior do que no período chuvoso (12,764 µg.N⁻¹m⁻³). Ao observar o gráfico de *boxplot* para esse parâmetro (Figura 2A), essa diferença fica mais evidente em razão dos diferentes perfis de dispersão dos dados observados.

Considerando-se as emissões de poluentes atmosféricos constantes ao longo dos períodos seco e chuvoso, é possível que as diferenças na concentração de MP_{2,5} observadas estejam relacionadas aos parâmetros meteorológicos. Assim, comparando-se a precipitação, as temperaturas média, mínima e máxima e a UR, verificam-se diferenças significativas entre os períodos seco e chuvoso pelo teste U de Mann-Whitney ($\alpha=0,05$) (Tabela 4 e Figura 2).

A precipitação, que na região de estudo é concentrada nos meses de outubro a março (primavera-verão), de acordo com as normais climatológicas (RAMOS *et al.*, 2009), pode contribuir para a lavagem da atmosfera, favorecendo o carreamento e/ou dissolução dos compostos poluentes com a água e diminuindo suas concentrações no ar. Perfil semelhante pode ser observado em relação à UR, que também foi significativamente maior no período de primavera-verão (mediana de 61,8%) do que no outono-inverno (mediana de 55,5%). Apesar de esse parâmetro somente representar o vapor de água disponível na atmosfera, e não a água livre, ele pode ser incorporado às partículas de poeira em suspensão, dando a elas maior massa e, conseqüentemente, possibilidades de agregação e deposição, sendo removidas da atmosfera (ELMINIR, 2005). Isso pode ser constatado quando se avalia a maior recorrência de doenças respiratórias no período de inverno na região de estudo, onde baixas umidades relativas estão associadas a maior concentração de poluentes.

Para as temperaturas médias, mínimas e máximas, torna-se difícil avaliar seu papel na dinâmica de concentração do MP_{2,5} na atmosfera, apesar das diferenças significativas observadas entre os períodos avaliados. No entanto, aliadas a outros fatores, é de conhecimento que as temperaturas contribuem para a ocorrência e a distribuição das chuvas nas diferentes épocas do ano. Como já discutido, as chuvas possuem importante papel na remoção desses poluentes da atmosfera, sendo as temperaturas um fator indiretamente associado a isso.

Tabela 4 - Resultados dos testes estatísticos aplicados para a verificação de diferenças significativas entre os períodos seco e chuvoso.

Parâmetro	Teste U de Mann-Whitney ($\alpha=0,05$)	
	p	Significativo
Material particulado	<0,0001	Sim
Precipitação	<0,0001	Sim
Temperatura mínima	<0,0001	Sim
Temperatura máxima	<0,0001	Sim
Temperatura média	<0,0001	Sim
Umidade relativa	<0,0001	Sim
Velocidade do vento	0,4544	Não

Por fim, outro parâmetro que pode estar relacionado à concentração do MP_{2,5} na atmosfera são os ventos, com a ação conjunta da intensidade (velocidade) e da direção. Nesse sentido, apesar de a velocidade diária média não ter apresentado diferenças significativas entre os períodos seco e chuvoso pelo teste U de Mann-Whitney ($\alpha=0,05$), sua ação conjunta com a direção poderia trazer respostas mais efetivas sobre seu papel na distribuição dos poluentes atmosféricos. Nenhum teste estatístico, porém, foi feito para comparar a direção do vento entre os períodos seco e chuvoso, já que os ventos são dados vetoriais (adimensionais) fornecidos pelo INMET nos horários das 0, 12 e 18h UTC.

Por outro lado, foi possível avaliar sua frequência de distribuição no tempo juntamente com as faixas de velocidades observadas, como verificado na Figura 3. Assim, no período seco ocorre distribuição mais homogênea dos ventos entre as direções sudeste, leste e nordeste (em torno de 27% para cada uma). Por outro lado, no período chuvoso, observou-se predominância de ventos de leste (40%), nordeste (27%) e sudeste (15%). Dessa maneira, considerando que a pluma de poluentes será carregada pelos ventos, essas variações na direção predominante, associadas às velocidades, podem ter contribuído para as diferenças observadas entre a concentração de MP_{2,5} em Belo Horizonte nos períodos seco e chuvoso.

Correlação entre os dados de material particulado e parâmetros meteorológicos

Considerando os resultados observados para os testes de normalidade, foram conduzidos testes de correlação para postos de Spearman, seguidos do teste de hipóteses para a significância da correlação ($\alpha=0,05$), para investigar a associação entre os parâmetros meteorológicos precipitação, UR, velocidade e direção do vento e a concentração de MP_{2,5}. Todos os testes foram conduzidos com 149 pares de dados, considerando apenas dias em que ambos os dados meteorológicos e de material particulado estavam disponíveis. Os resultados podem ser verificados na Tabela 5.

Os parâmetros meteorológicos precipitação e UR apresentaram correlação significativa, ao nível de significância avaliado, com o parâmetro MP_{2,5}, enquanto os parâmetros velocidade e direção do vento apresentaram correlação não significativa.

Nota-se que os coeficientes de correlação significativos apresentaram valor negativo, indicando que maiores valores de precipitação e UR podem indicar menores concentrações de MP_{2,5} na atmosfera. Essa observação é indicativa da importância dos mecanismos de nucleação e impactação que acontecem na atmosfera. Na nucleação, as partículas em suspensão no ar atuam como núcleos de condensação de gotículas de água, aumentando seu tamanho e densidade, favorecendo sua deposição. No mecanismo de impactação, as gotículas de chuva impactam dinamicamente ou absorvem partículas na atmosfera durante os fenômenos de precipitação, também favorecendo sua deposição úmida

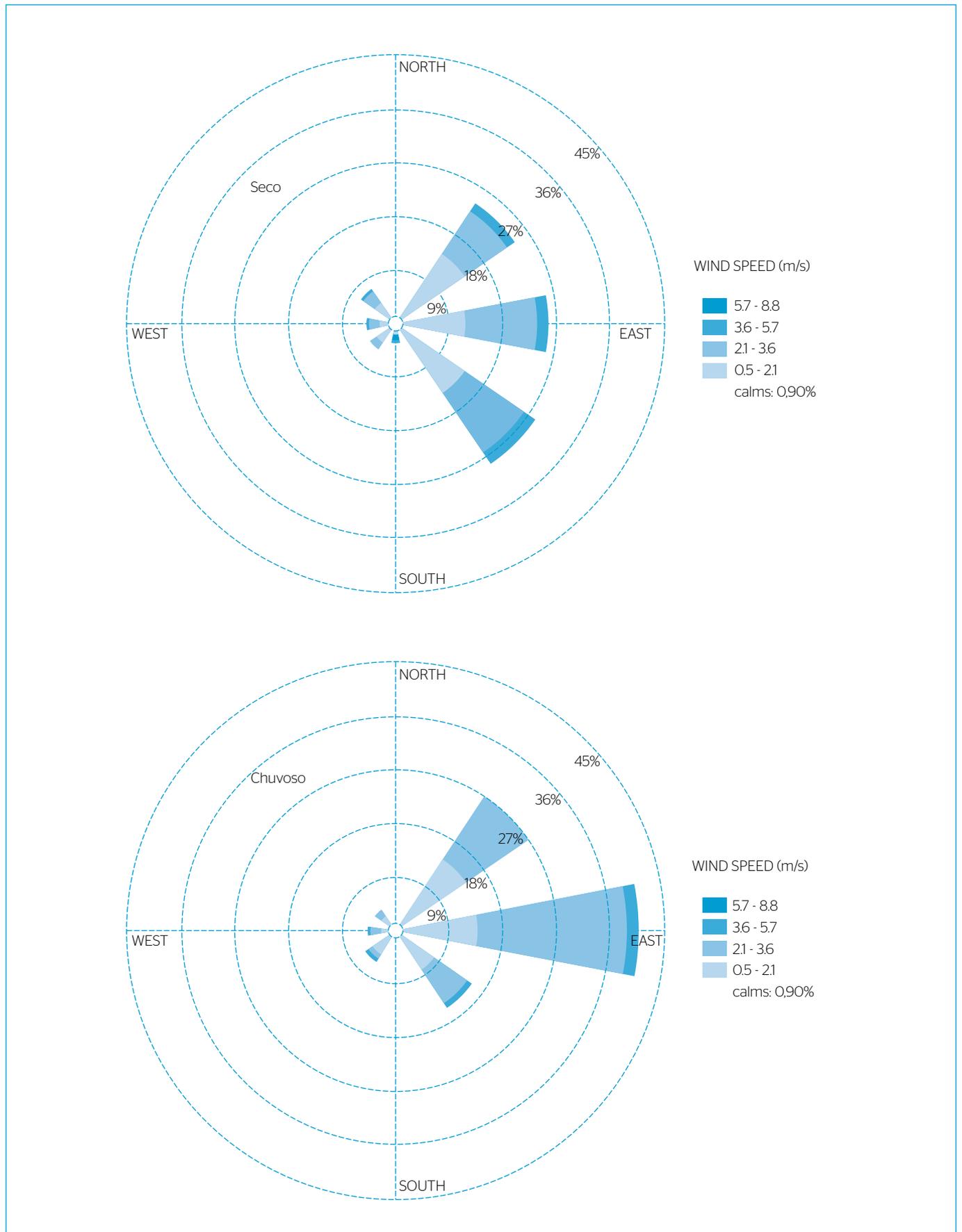


Figura 3 - Avaliação da direção e da velocidade dos ventos na área de estudo para as estações seca e chuvosa.

e, conseqüentemente, remoção da atmosfera local (ELMINIR, 2005; KATSOULIS, 1996).

Ainda assim, as correlações observadas podem ser consideradas regulares, de acordo com a escala de avaliação qualitativa de Callegari-Jacques (2003). Essa intensidade relativamente baixa indica que, individualmente, as variáveis não são suficientes para explicar de maneira eficaz a variabilidade da variável dependente $MP_{2,5}$.

Apesar de a direção e a velocidade do vento serem consideradas uma das principais condições meteorológicas que afetam a concentração de poluentes atmosféricos em determinadas regiões (CHEN *et al.*, 2018; CSAVINA *et al.*, 2014), as correlações fracas e não significativas observadas para esses parâmetros no presente estudo não permitiram identificar sua influência na concentração de $MP_{2,5}$ em Belo Horizonte. Na literatura, contudo, são observados estudos que conseguem identificar essas relações. Wang e Ogawa (2015), ao investigarem a correlação entre a velocidade do vento e a concentração de $MP_{2,5}$ na cidade de Nagasaki (Japão), observaram valores de correlação linear (R) variando de 0,124 a 0,554, notando que altas velocidades do vento (maiores que 3 m/s) eram responsáveis pelo transporte desse poluente por longas distâncias. Esses autores trabalharam com uma base de dados horária tanto para as concentrações de $MP_{2,5}$ quanto para os parâmetros meteorológicos, destacando a importância dessa

qualidade do banco de dados em razão da grande variabilidade observada no parâmetro $MP_{2,5}$ ao longo de um dia. Esse fato pode estar relacionado à não observância de correlações significativas entre a velocidade do vento e o $MP_{2,5}$ no presente estudo, uma vez que os dados utilizados eram médias diárias.

Regressão linear simples entre dados que apresentaram correlação significativa

Análises de regressão foram conduzidas para os parâmetros de precipitação e UR, como variáveis independentes, em relação ao $MP_{2,5}$, variável dependente na análise. Nas Figuras 4 e 5, podem ser visualizados a linha resultante dos modelos lineares ajustados e um intervalo de confiança de 95% para predição dos valores de $MP_{2,5}$ a partir dos parâmetros precipitação e UR, respectivamente. As mesmas figuras apresentam os dados experimentais, em gráfico de dispersão, e os coeficientes de correlação de Pearson (r) utilizados na análise. Nota-se que, em ambos os casos, os coeficientes obtidos pela análise não paramétrica (Spearman) têm valores absolutos maiores do que aqueles obtidos pela análise paramétrica (Pearson). Essa diferença pode ser resultante das vantagens do tratamento dos dados como postos, melhorando a estimativa da relação entre as variáveis ao “bloquear” a variabilidade randômica e amortecendo o efeito de *outliers*.

Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Spearman para as relações entre a concentração de material particulado e os parâmetros meteorológicos ($\alpha=0,05$).

Parâmetro	Coeficiente de correlação de Spearman ($\alpha=0,05$)				
	N. pares	R_s	p	Significativo	Avaliação da correlação
Precipitação	149	-0,386806	0,000001	Sim	Regular
Umidade relativa	149	-0,563400	0,000000	Sim	Regular
Velocidade do vento	149	-0,113949	0,166445	Não	Fraca
Direção do vento	149	0,053547	0,516605	Não	Fraca

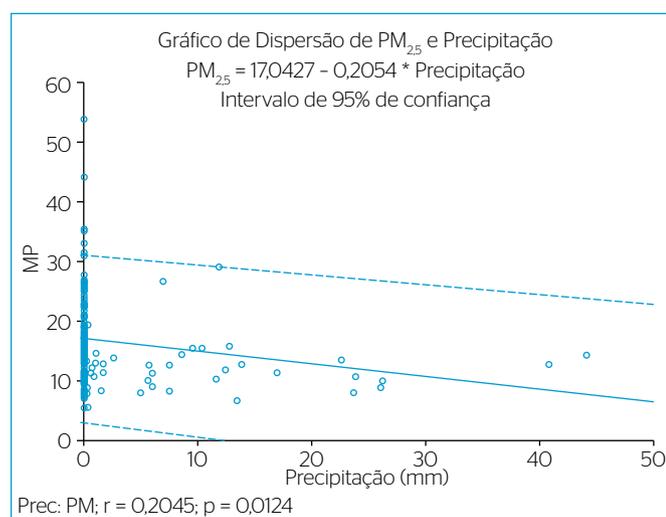


Figura 4 - Dispersão e análise de regressão linear, com intervalo de confiança de 95%, do material particulado (MP) e do parâmetro meteorológico precipitação (Prec).

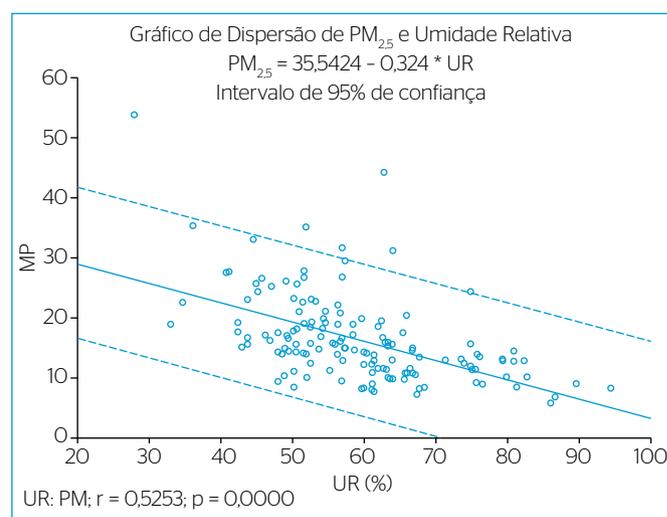


Figura 5 - Dispersão e análise de regressão linear, com intervalo de confiança de 95%, do material particulado (MP) e do parâmetro meteorológico umidade relativa do ar (UR).

Os coeficientes de determinação dos modelos avaliados ($R^2_{\text{Precipitação}}=0,0418$ e $R^2_{\text{UR}}=0,2759$) indicam que os modelos lineares encontrados podem explicar apenas 4 e 28% da variância dos dados observados. Assim, os modelos fornecem informações sobre o comportamento da variável $MP_{2,5}$ em relação a esses parâmetros meteorológicos, mas indicam que a análise de outras variáveis, como a presença de outros poluentes na atmosfera que podem ser precursores do $MP_{2,5}$, é necessária para o estabelecimento de um modelo que explique satisfatoriamente a variância dos dados.

CONCLUSÕES

Os resultados dos testes estatísticos descritos neste trabalho confirmam a existência de diferenças significativas entre os parâmetros meteorológicos (precipitação, UR, velocidade e direção do vento) e de $MP_{2,5}$ nas estações seca e chuvosa de Belo Horizonte. Além disso, observaram-se

algumas correlações entre os parâmetros meteorológicos e a concentração de $MP_{2,5}$, identificando que a UR e a precipitação foram os fatores que afetaram mais significativamente a ocorrência desse poluente na atmosfera. O melhor entendimento da influência das variáveis meteorológicas nas variações da concentração de $MP_{2,5}$ na atmosfera pode contribuir para a implantação de ações que minimizem o impacto da poluição nas cidades. Para pesquisas futuras, sugere-se a incorporação de outros parâmetros de qualidade do ar nas análises, além da concentração de material particulado, bem como o uso de estatísticas multivariadas para ampliar o entendimento do comportamento dos poluentes sob a influência das condições meteorológicas.

FONTE DE FINANCIAMENTO

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, T.T.A. (2005) *Distribuições de tamanho, composição química e identificação das fontes do aerossol atmosférico de São Paulo: um estudo de caso para o inverno de 2003*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ANDRADE, M.F.; MIRANDA, R.M.; FORNARO, A.; KERR, A.; OYAMA, B.; ANDRE, P.A.; SALDIVA, P. (2012) Vehicle emissions and PM 2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere and Health*, v. 5, n. 1, p. 79-88. <https://dx.doi.org/10.1007%2Fs11869-010-0104-5>
- BRASIL. (1990) *Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990*. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Brasília: CONAMA.
- CALLEGARI-JACQUES, S. (2003) *Bioestatística: princípios e aplicações*. Porto Alegre: Artmed. 255 p.
- CHEN, Z.; XIE, X.; CAI, J.; CHEN, D.; GAO, B.; HE, B.; CHENG, N.; XU, B. (2018) Understanding meteorological influences on $PM_{2,5}$ concentrations across China: a temporal and spatial perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, v. 18, p. 5343-5358. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/acp-2017-376>>.
- CSAVINA, J.; FIELD, J.; FÉLIX, O.; CORRAL-AVITIA, AY.; SÁEZ, AE.; BETTERTON, E.A. (2014) Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. *Science of the Total Environment*, v. 487, p. 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.138>
- ELMINIR, H.K. (2005) Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of the Total Environment*, v. 350, n. 1-3, p. 225-237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.043>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2016) *Minas Gerais*: Belo Horizonte. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=310620>>. Acesso em: 3 nov. 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Estação Meteorológica de Observação de Superfície Convencional. Rede de Estações. *Dados Históricos*. Brasil: INMET. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>>. Acesso em: 23 abr. 2016.
- KATSOULIS, B.D. (1996) The relationship between synoptic, mesoscale and microscale meteorological parameters during poor air quality events in Athens, Greece. *Science of the Total Environment*, v. 181, n. 1, p. 13-24. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04953-3](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04953-3)
- MIRANDA, R.M.; ANDRADE, M.F.; FORNARO, A.; ASTOLFO, R.; ANDRE, P.A.; SALDIVA, P. (2012) Urban air pollution: A representative survey of PM 2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere and Health*, v. 5, n. 1, p. 63-77. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0124-1>
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). (2016) *Níveis de poluição do ar estão crescendo em muitas das cidades mais pobres do mundo*. Brasil: OMS. Disponível em <http://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=5096%3Aniveis-de-poluicao-do-ar-estao-crescendo-em-muitas-das-cidades-mais-pobres-do-mundo&Itemid=839>. Acesso em: 30 mar. 2016.
- PRODI, F.; TAMPIERI, F. (1982) The removal of particulate matter from the atmosphere: the physical mechanisms. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, v. 120, n. 2, p. 286-325. <https://doi.org/10.1007/BF00877038>

RAMOS, A.M.; SANTOS, L.A.R.; FORTES, L.T.G (Orgs.). (2009) *Normais climatológicas do Brasil 1961-1990*. Brasília: INMET.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). (2016) *Particulate Matter (PM) Pollution*. Estados Unidos: USEPA. Disponível em <<https://www.epa.gov/pm-pollution>>. Acesso em: 23 abr. 2016.

VALLERO, D. (2014) *Fundamentals of air pollution*. 5. ed. San Diego: Academic Press. 986 p.

WANG, J.; OGAWA, S. (2015) Effects of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentrations in Nagasaki, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 12, n. 8, p. 9089-9101. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809089>

