



Modelagem das trajetórias das massas de ar (HYSPLIT) aplicada ao monitoramento de material particulado fino (MP_{2,5}) como ferramenta de gestão da qualidade do ar

Darlan Daniel Alves ¹, Roberta Plangg Riegel ², Alessa Ceratti ³, Bruna Schmidt ⁴, Daniela M. M. Osório ⁵

¹Universidade Feevale (darlandaniel@gmail.com)

² Universidade Feevale (roplangg@yahoo.com.br)

³ Universidade Feevale (alessaceratti@hotmail.com)

⁴ Universidade Feevale (brunacschmidt@hotmail.com)

⁵ Universidade Feevale (danielaosorio@feevale.br)

Resumo

A degradação da qualidade do ar, especialmente em áreas urbanas, tem se tornado um sério problema ambiental. O objetivo deste estudo foi aplicar técnicas de modelagem de dispersão atmosférica em conjunto com o monitoramento ativo de MP_{2,5} em uma área urbana da região metropolitana de Porto Alegre (RMPA) e analisar os resultados por meio da Função de Probabilidade Condicional (FPC). Foram identificados dois setores críticos, em termos de contribuições para as concentrações extremas de PM_{2,5}, definidos como SSO e SSE. Os resultados demonstraram que a aplicação destas técnicas em conjunto pode contribuir consideravelmente para a determinação de setores prioritários, em termos de contribuições para concentrações elevadas de PM_{2,5} e, consequentemente, o estabelecimento de ações que visem a minimização dos impactos gerados pela poluição atmosférica.

Palavras-chave: Qualidade do Ar. Material Particulado. HYSPLIT.

Área Temática: Gestão Ambiental Pública.

Atmospheric dispersion modeling applied to the monitoring of fine particulate matter (MP_{2.5}) as an air quality management tool

Abstract

Degradation of air quality, especially in urban areas, has become a serious environmental issue. The objective of this study was to apply atmospheric dispersion modeling techniques together with the active monitoring of MP_{2.5} in an urban area of the metropolitan region of Porto Alegre (MRPA) and to analyze the results through the Conditional Probability Function (FPC). Two critical sectors were identified in terms of contributions to the extreme concentrations of PM_{2.5}, defined as SSO and SSE. The results showed that the application of these techniques together can contribute considerably to the determination of priority sectors, in terms of contribution to high concentration of PM_{2.5}, and consequently, the establishment of actions aimed at minimizing the impacts generated by air pollution.

Key words: Air Quality. Particulate Matter. HYSPLIT.

Theme Area: Public Environmental Management.



1 Introdução

A poluição atmosférica tornou-se uma questão de relevância global, devido aos impactos adversos causados por emissões de origem antrópica sobre a saúde humana e meio ambiente. Em áreas urbanas, a degradação da qualidade do ar é causada, principalmente, pela emissão de compostos gerados a partir da queima de combustíveis fósseis, tráfego veicular e atividades industriais.

O material particulado (MP) destaca-se entre os principais poluentes atmosféricos devido as variações que podem ocorrer no diâmetro aerodinâmico e composição das partículas, os quais variam consideravelmente em função de fatores como condições meteorológicas, características das fontes de emissão e características topográficas da área afetada. Por este motivo, este poluente tem sido estudado em suas frações grossa ($MP_{2,5-10}$) e fina ($MP_{2,5}$), ou seja, de acordo com os diâmetros aerodinâmicos das partículas (entre 2,5 e 10 μm e menor do que 2 μm , respectivamente). O MP é responsável por uma série de problemas, como impactos na saúde humana, no meio ambiente, na visibilidade e no clima (CHEUNG et al. 2005; HARRISON e YIN 2000; TAI et al., 2010).

O $MP_{2,5}$ é atribuído, principalmente, a fontes antrópicas e emissão (SEINFELD; PANDIS, 2006). Estas partículas podem penetrar profundamente nos pulmões e se depositar em regiões alveolares durante a respiração bucal, podendo ser absorvido na corrente sanguínea, acarretando uma grande variedade de problemas de saúde, como: morte prematura em pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, ataques cardíacos não fatais, batimentos cardíacos irregulares, agravamento da asma, diminuição da função pulmonar e aumento dos sintomas respiratórios de irritação das vias aéreas, tosse ou dificuldade em respirar (EPA, 2017).

A modelagem da dispersão atmosférica é a simulação matemática de como as massas de ar se dispersam na atmosfera e pode ser executada por meio de *softwares* que resolvem as equações e algoritmos matemáticos de simulação de dispersão. Os modelos de dispersão são usados em conjunto com o monitoramento da poluição atmosférica para estimar ou prever as concentrações dos poluentes a favor do deslocamento das massas de ar, emitidos principalmente por fontes como plantas industriais, tráfego de veículos, entre outros (STEIN et al., 2015; HOPKE et al., 2015; ZHANG et al., 2015).

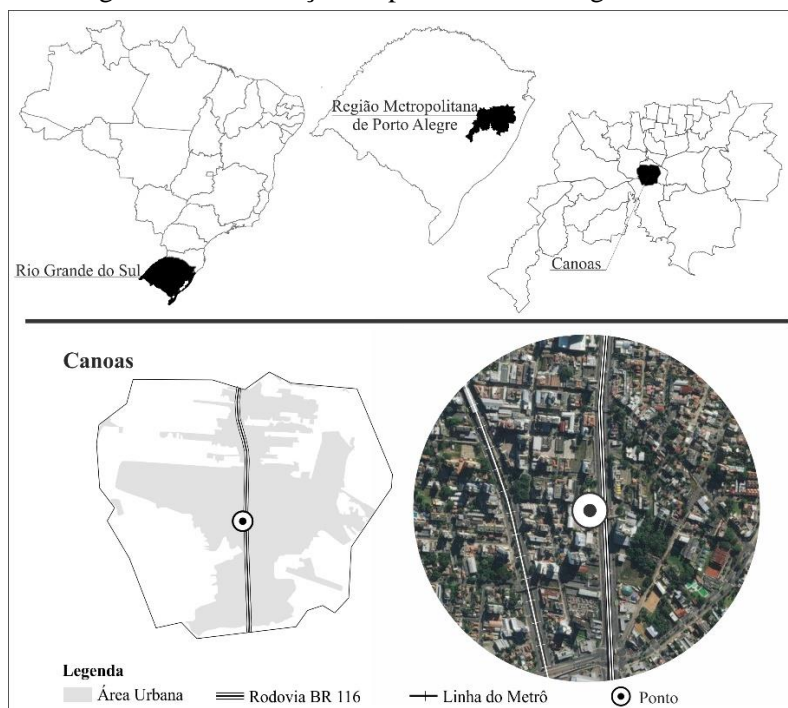
Este trabalho tem como objetivo principal a aplicação de técnicas de modelagem de dispersão atmosférica em conjunto com o monitoramento ativo de MP amostrado em uma área urbana da região metropolitana de Porto Alegre (RMPA), a fim de se identificar as direções dos deslocamentos das massas de ar relacionadas à ocorrência de eventos extremos de concentrações de $MP_{2,5}$, utilizando a Função de Probabilidade Condicional (FPC). Os resultados provenientes da modelagem e do monitoramento do MP serão discutidos sob o enfoque da utilização conjunta dessas ferramentas no desenvolvimento de estratégias de gestão ambiental pública.

2 Metodologia

O $MP_{2,5}$ foi amostrado quinzenalmente em uma área urbana da Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), localizada no município de Canoas (Figura 1), o qual apresenta uma população estimada em 338,5 mil habitantes e densidade demográfica de 2470,1 habitantes por km^2 . O ponto de amostragem está localizado a aproximadamente 60 m da Rodovia BR 116.



Figura 1 – Localização do ponto de amostragem



As amostragens foram realizadas utilizando-se um amostrador do tipo Suporte de Filtros Empilhados (SFE), também conhecido como amostrador de Gent (MAENHAUT et al., 1993; HOPKE et al., 1997), a partir de maio de 2016 até abril de 2017. O amostrador SFE funciona como um amostrador dicotômico e consiste em um conjunto de dois filtros sequenciais conectados a uma bomba de vácuo, onde o primeiro (em sentido oposto à direção do fluxo de ar) coleta o $PM_{2,5-10}$ e o segundo filtro (em sequência), coleta o $PM_{2,5}$. Foram utilizados filtros de polycarbonato (Millipore, Isopore) com tamanho de poro de 10 e 2 μm (47 mm de diâmetro), para a amostragem do $PM_{2,5-10}$ e $PM_{2,5}$, respectivamente (ALVES et al., 2015; ILLI et al., 2017). As massas do MP foram determinadas por análise gravimétrica. A determinação das concentrações do $MP_{2,5}$ ($\mu g m^{-3}$) foi realizada por meio do cálculo da diferença entre as massas dos filtros antes e após as coletas, pelo volume total de ar amostrado. Todos os filtros utilizados nas coletas foram armazenados em dessecador por um período mínimo de 72 horas em um ambiente climatizado (25 ± 5 °C e umidade relativa de 30 a 40%) antes das pesagens.

As trajetórias retroativas das massas de ar foram calculadas utilizando-se o modelo *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT) desenvolvido pelo Air Resources Laboratory (ARL) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dos Estados Unidos da América (STEIN et al., 2015). O conjunto de dados GDAS (resolução de 1 grau) fornecido pelo *Global Data Assimilation System* (GDAS) foi usado para produzir as trajetórias retroativas, as quais iniciaram 48 horas antes do início das amostragens (09:00 horas) e tiveram duração total de 72 horas, à altura de 500 m acima do nível do solo (ANS). A altura foi especificada com base em trabalhos previamente realizados e corresponde a representação do transporte de MP na camada mais baixa da atmosfera terrestre, a qual se estende até cerca de 1 km (ZHANG et al., 2015). A opção *Back Trajectory* foi usada. Esta opção permite simular trajetórias retroativas no tempo, ou seja, a partir da especificação das coordenadas de destino (ponto de amostragem), o modelo traça as trajetórias a partir dos possíveis pontos de origem, em função das condições climáticas, em um intervalo de tempo especificado, até o destino. Trajetórias retroativas das massas de ar tem sido amplamente empregadas para determinar a origem de massas de ar e estabelecer relações com as concentrações de poluentes atmosféricos e suas possíveis fontes de emissão (ORRU et al., 2010; COHEN et al., 2012; HOPKE et al.,



2015; ZHANG et al., 2015).

Os eventos extremos de concentrações de $MP_{2,5}$ para os quais o modelo HYSPLIT foi executado foram selecionados pelo critério das concentrações superiores ao 75º percentil, que corresponde a um limite comumente utilizado em estudos similares (KIM et al., 2004; AMATO e HOPKE, 2012). Após a determinação das concentrações de $MP_{2,5}$ e do cálculo das trajetórias das massas de ar, essas variáveis foram associadas e avaliadas em conjunto por meio da Função de Probabilidade Condicional (FPC) (ASHBAUGH et al., 1985; KIM et al., 2004; AMATO e HOPKE, 2012), a fim de investigar os impactos de fontes pontuais a partir de diferentes direções de deslocamento das massas de ar. A FPC é uma ferramenta comumente usada para avaliar os impactos de fontes pontuais, empregando estimativas de contribuição de fontes identificadas em modelos receptores e valores de direção dos ventos, medidos nos locais de monitoramento. Neste estudo, ao invés de empregar a variável direção dos ventos, as trajetórias das massas de ar serão utilizadas, em conjunto com as concentrações de $MP_{2,5}$. A FPC estima a probabilidade de que uma determinada fonte de emissão, localizada em uma determinada direção do deslocamento das massas de ar exceda um limite predeterminado. A FPC é definida como:

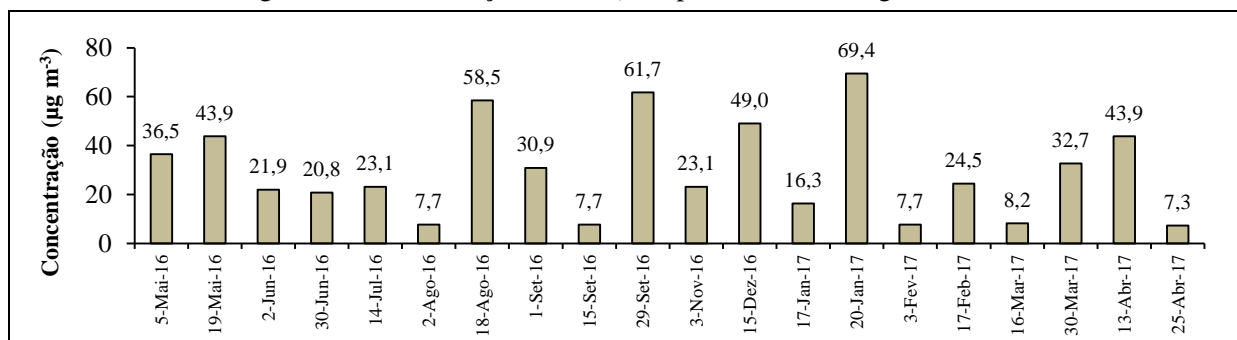
$$FPC_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}} \quad \text{Equação 1}$$

onde $m_{\Delta\theta}$ é o número de ocorrências de trajetórias de massas de ar em um determinado setor $\Delta\theta$ que excedeu o critério de limite (75º percentil), e $n_{\Delta\theta}$ é o número total de trajetórias de massas de ar que ocorreram no setor em questão. Neste estudo, foram utilizados 8 setores ($\Delta\theta = 45^\circ$), definidos como ENE ($0^\circ - 45^\circ$), NNE ($45^\circ - 90^\circ$), NNO ($90^\circ - 135^\circ$), ONO ($135^\circ - 180^\circ$), OSO ($180^\circ - 225^\circ$), SSO ($225^\circ - 270^\circ$), SSE ($270^\circ - 315^\circ$) e ESE ($315^\circ - 360^\circ$). Os resultados podem variar entre 0 e 1, sendo que os valores mais elevados de probabilidade condicional indicam as direções mais prováveis das fontes de emissão do poluente monitorado. Embora as trajetórias tenham sido calculadas considerando 72 horas de antecedência à realização das coletas, somente as últimas 24 foram usadas para cálculo da FPC.

3 Resultados

A Figura 2 apresenta um gráfico com as concentrações de $MP_{2,5}$ por data de amostragem.

Figura 2 – Concentração de $MP_{2,5}$ no ponto de amostragem Canoas

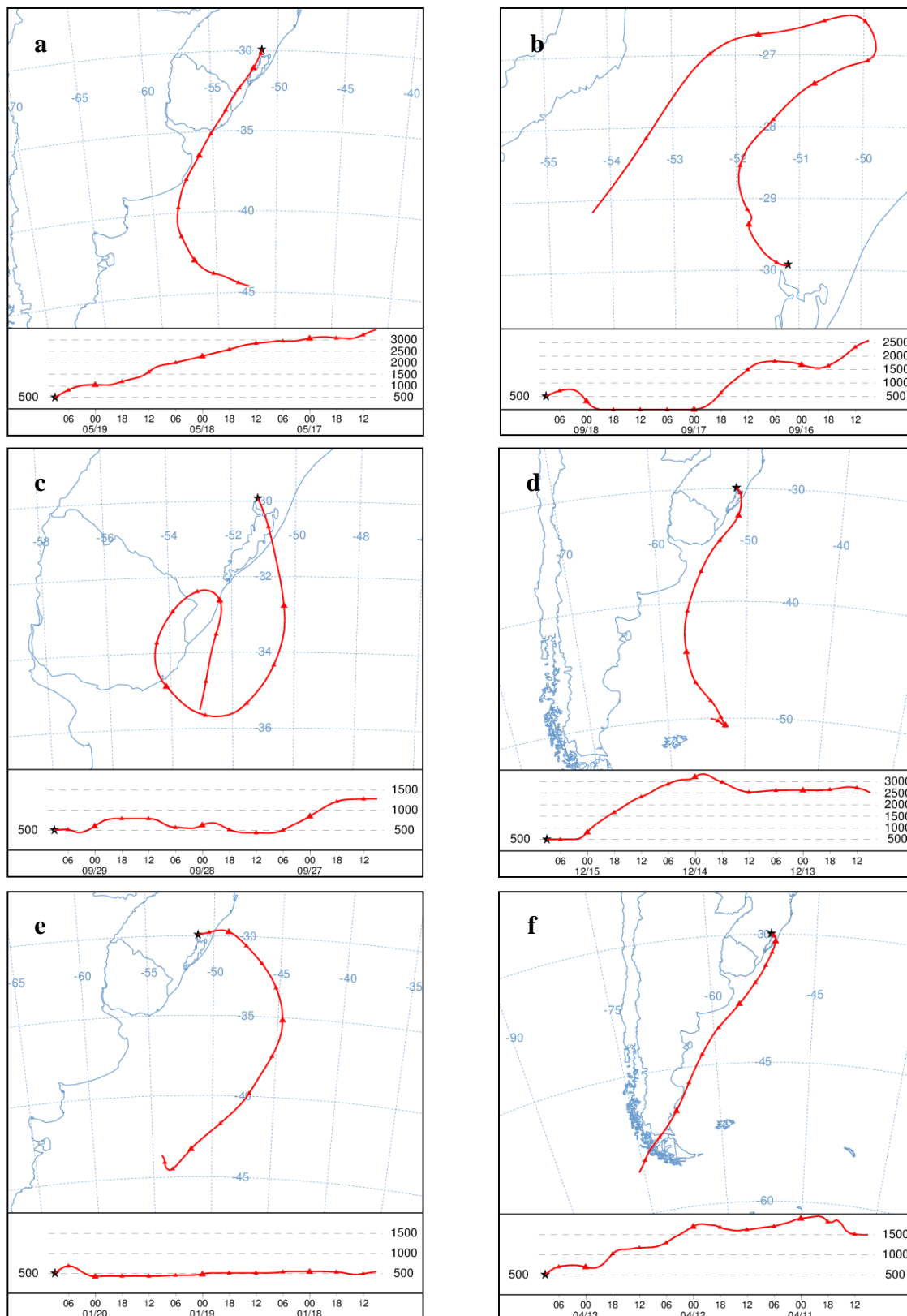


Os eventos extremos das concentrações de $MP_{2,5}$ ocorreram nas seguintes datas: 19 de maio de 2016 ($MP_{2,5} = 43,9 \mu\text{g m}^{-3}$), 18 de agosto de 2016 ($MP_{2,5} = 58,5 \mu\text{g m}^{-3}$), 29 de setembro de 2016 ($MP_{2,5} = 61,7 \mu\text{g m}^{-3}$), 15 de dezembro de 2016 ($MP_{2,5} = 49,0 \mu\text{g m}^{-3}$), 20 de janeiro de 2017 ($MP_{2,5} = 69,4 \mu\text{g m}^{-3}$) e 13 de abril de 2017 ($MP_{2,5} = 43,9 \mu\text{g m}^{-3}$).



As trajetórias retroativas das massas de ar (72 horas) referentes a esses eventos são apresentadas na Figura 3a, 3b, 3c, 3d, 3e e 3f, respectivamente.

Figura 3 – Trajetórias das massas de ar para os eventos extremos de concentração de $MP_{2,5}$





A Tabela 1 apresenta os resultados dos valores de $m_{\Delta\theta}$, $n_{\Delta\theta}$ e FPC para cada um dos setores estabelecidos neste trabalho.

Tabela 1 – Resultados da FPC

| Setor | $m_{\Delta\theta}$ | $n_{\Delta\theta}$ | FPC |
|-------|--------------------|--------------------|-----|
| ENE | 1 | 2 | 0,5 |
| NNE | 0 | 4 | 0 |
| NNO | 1 | 5 | 0,2 |
| ONO | 1 | 2 | 0,5 |
| OSO | 0 | 5 | 0 |
| SSO | 4 | 4 | 1,0 |
| SSE | 3 | 3 | 1,0 |
| ESE | 1 | 2 | 0,5 |
| ENE | 1 | 2 | 0,5 |

Os resultados apresentados na Tabela 1 demonstram que os setores mais representativos, em termos de contribuição para os valores extremos das concentrações de $MP_{2,5}$, são os setores SSO e SSE, os quais apresentaram $FPC = 1$.

4 Conclusão

A metodologia apresentada neste trabalho pode ser empregada no desenvolvimento de estratégias para preservação da qualidade do ar, com a implementação de ações capazes de minimizar os impactos prejudiciais da poluição sobre os ecossistemas, priorizando os setores críticos (neste caso, SSO e SSE). Entre essas ações, sugere-se o estabelecimento de políticas ambientais/industriais que incentivem a diminuição das emissões de MP, bem como políticas que valorizem e incentivem formas alternativas de mobilidade urbana.

Os resultados deste trabalho, que ainda podem ser complementados com um programa de monitoramento que contemple um número maior de amostragens, bem como com um número maior de pontos de amostragem, demonstram que o uso de abordagens que contemplam técnicas de modelagem atmosférica em conjunto com o monitoramento ativo de MP podem contribuir de forma significativa como ferramentas para o desenvolvimento de estratégias de gestão e controle da qualidade do ar.

Referências

ALVES, D. D.; OSÓRIO, D. M. M.; RODRIGUES, M. A. S.; ILLI, J. C.; BIANCHIN, L.; BENVENUTI, T. *Concentrations of $PM_{2.5-10}$ and $PM_{2.5}$ and metallic elements around the Schmidt Stream area, in the Sinos River Basin, southern Brazil*. **Brazilian Journal of Biology**, v.75, n. 4, suppl. 2, pp. 43-52, 2015.

AMATO, F.; HOPKE, P. K. *Source apportionment of the ambient $PM_{2.5}$ across St. Louis using constrained positive matrix factorization*. **Atmospheric Environment**, v. 46, p. 329-337, 2012.

ASHBAUGH, L. L.; MALM, W. C.; SADEH, W. Z. *A Residence Time Probability Analysis of Sulfur Concentrations at Grand Canyon National Park*. **Atmospheric Environment - Part A General Topics**, v. 19, n. 8, p. 1263-1270, 1985.



CHEUNG, H. C.; WANG, T.; BAUMANN, K.; GUO, H. *Influence of regional pollution outflow on the concentrations of fine particulate matter and visibility in the coastal area of southern China*. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 34, p. 6463-6474, 2005.

COHEN, D. D.; CRAWFORD, J.; STELCER, E.; ATANACIO, A. J. *Application of positive matrix factorization, multi-linear engine and back trajectory techniques to the quantification of coal-fired power station pollution in metropolitan Sydney*. **Atmospheric Environment**, v. 61, p. 204-211, 2012.

EPA. **Particulate Matter (PM) Pollution**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>>. Acesso em: 13 nov. 2017.

HARRISON, R. M.; YIN, J. *Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?* **Science of the Total Environment**, v. 249, n. 1-3, p. 85-101, 2000.

HOPKE, P. K.; XIE, Y.; RAUNEMAA, T.; BIEGALSKI, S.; LANDSBERGER, S.; MAENHAUT, W.; ARTAXO, P. COHEN, D. *Characterization of the Gent Stacked Filter Unit PM10 Sampler*. **Aerosol Science and Technology**, v. 27, n. 6, p. 726-735, 1997.

HOPKE, P. K.; KANE, C.; UTELL, M. J.; CHALUPA, D. C.; KUMAR, P.; LING, F.; GARDNER, B.; RICH, D. Q. *Triggering of myocardial infarction by increased ambient fine particle concentration: Effect modification by source direction*. **Environmental Research**, v. 142, p. 374-379, 2015.

ILLI, J. C.; VANCETTA, T.; ALVES, D. D.; OSÓRIO, D. M.; BIANCHIN, L.; DE QUEVEDO, D. M.; JUCHEM, F. *Integrated assessment of air pollution by metals and source apportionment using ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) in southern Brazil*. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 24, n. 3, p. 2790-2803, 2017.

KIM, E.; HOPKE, P. K.; LARSON, T. V.; COVERT, D. S. *Analysis of ambient particle size distributions using unmix and positive matrix factorization*. **Environmental science & technology**, v. 38, n. 1, 202-209, 2004

MAENHAUT, W.; FRANCOIS, J.; CAFMEYER, J. **The "Gent" Stacked Filter Unit Sampler for the Collection of Atmospheric Aerosols in Two Size Fractions: Description and Instructions for Installation and Use**. Coordinated Research Programme: CRP E4.10.08. Vienna, International Atomic Energy Agency, p. 249-263, 1993.

ORRU, H.; KIMMEL, V.; KIKAS, Ü; SOON A.; KÜNZLI, N.; SCHINS R. P. F.; BORM, P. J. A.; FORSBERG, B. *Elemental composition and oxidative properties of PM_{2.5} in Estonia in relation to origin of air masses - results from the ECRHS II in Tartu*. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 7, p. 1515-1522, 2010.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1203 p., 2006.

STEIN, A. F.; DRAXLER, R. R.; ROLPH, G. D.; STUNDER, B. J. B.; COHEN, M. D. *NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System*. **American Meteorological Society**, p. 2059-2077, 2015.



TAI, A. P. K.; MICKLEY, L. J.; JACOB, D. J. *Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change.* **Atmospheric Environment**, v. 44, p. 3976-3984, 2010.

ZHANG, Z.Y.; WONG, M. S.; LEE, K. H. *Estimation of potential source regions of $PM_{2.5}$ in Beijing using backward trajectories.* **Atmospheric Pollution Research**, v. 6, p. 173-177, 2015.