

X-022 – MODELAGEM DE DISPERSÃO DE EMISSÕES VEICULARES IMPLEMENTANDO FONTES PONTUAIS E ÁREA

Andy de Sousa Maes⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e mestranda em Engenharia Ambiental na UFSC.

Júlia Moore⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Leonardo Hoinaski⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Doutor em Engenharia Ambiental pela UFSC. Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC e supervisor do Laboratório de Controle da Qualidade do Ar (LCQAr).

Endereço⁽¹⁾: Laboratório de Controle da Qualidade do Ar – LCQAr. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rua Delfino Conti - Trindade - Florianópolis - SC - CEP: 88.040-970 - Brasil – Telefone: (48) 3721 – 4993. Email: leonardo.hoinaski@ufsc.br

RESUMO

A poluição atmosférica é, reconhecidamente, um dos principais riscos para a saúde ambiental na atualidade. Em centros urbanos, uma das principais fontes de poluição são as emissões provenientes da queima de combustível em veículos automotores. Por este motivo, a aplicação de ferramentas para quantificar e avaliar o impacto de emissões veiculares na saúde da população tem sido amplamente estudada. Para este fim, estudos de qualidade do ar utilizam modelos matemáticos de dispersão. Ainda não existe um consenso sobre a melhor maneira de implementar de fontes veiculares em modelos de qualidade do ar. Neste contexto, o objetivo do presente estudo foi comparar o desempenho do modelo AERMOD na estimativa de concentrações de NO₂, utilizando fontes pontuais e área. Para tanto, o modelo foi aplicado à Avenida Beira Mar Norte, localizada em Florianópolis/SC. As fontes pontuais resultaram em concentrações máximas horárias 23% menores do que as de fontes área. Esta diferença diminuiu para 7,7% quando foram analisadas médias aritméticas anuais. Em geral, as plumas horárias resultantes de fontes área foram mais abrangentes, apresentando concentrações críticas ao longo de toda a avenida. Este estudo também forneceu uma estimativa preliminar da qualidade do ar no entorno da avenida. Em ambas as configurações, os resultados apontaram que os indivíduos que transitam no entorno da Av. Beira Mar Norte podem estar expostos a concentrações de NO₂ prejudiciais à saúde. Sendo recomendados, desta forma, estudos de qualidade do ar aprofundados na região.

PALAVRAS-CHAVE: Poluição atmosférica, emissões veiculares, modelagem de dispersão, qualidade do ar.

INTRODUÇÃO

Os efeitos da poluição atmosférica na saúde humana e no ambiente são amplamente estudados na atualidade. Pesquisas relacionam a vida em centros urbanos poluídos à complicações nos sistemas cardiovascular e respiratório, e até mesmo a interferências em doenças como diabetes e no desenvolvimento neurológico de crianças (RÜCKERL *et al.*, 2011; UNEP, 2014). Estima-se que 3,7 milhões de mortes precoces em 2012 foram atribuídas à exposição ao ar ambiente poluído (UNEP, 2014). Além dos efeitos na saúde da população, os problemas causados pela poluição do ar também geram impactos econômicos e sociais. A diminuição da produtividade agrícola, o aumento de custos dos sistemas de saúde e aumento da vulnerabilidade das populações carentes podem ser vistos como exemplos de problemas causados pela contaminação do ar (IEMA, 2014). Neste sentido, evidencia-se a importância de identificar as principais fontes poluidoras e desenvolver estratégias de gestão e controle ambiental.

Em regiões do Brasil onde monitora-se a qualidade do ar, emissões provenientes do transporte viário representam uma das principais fontes de poluição atmosférica (CETESB, 2016; IEMA, 2011). Ainda assim, muitas localidades não controlam níveis de poluentes no ar. De acordo com o levantamento feito pelo Instituto Saúde e Sustentabilidade, apenas 11 das 27 unidades federativas do Brasil monitoram a qualidade do ar

(VORMITTAG et al., 2014). Neste contexto, a modelagem matemática da dispersão de poluentes torna-se uma ferramenta importante para a análise preliminar da qualidade do ar. Especificamente em relação à fonte veicular, os modelos permitem verificar a contribuição dos veículos dissociada de outras fontes de poluição.

Modelos matemáticos costumam ser constantemente melhorados através de estudos que comparam resultados de monitoramento, com resultados simulados. Um exemplo foi o trabalho de Heist *et. al.* (2013), que promoveu uma comparação do desempenho dos modelos de dispersão RLINE, AERMOD-volume, AERMOD-area, ADMS, CALINE3 e CALINE4 em simular as concentrações de poluentes do ar próximas a rodovias. Enquanto as configurações da série CALINE obtiveram as piores performances, ambas as configurações do modelo AERMOD obtiveram resultados mais próximos da realidade do que os outros modelos testados (HEIST et al., 2013).

O *AERMOD Modeling System* é o *software* recomendado pela US EPA (United States Environmental Protection Agency) para que os órgãos de fiscalização local e estadual determinem seu progresso quanto a redução de poluentes no ar ambiente. Conforme descrito no manual de usuário do modelo, dentre as opções de configurações, empregam-se fontes pontuais para simular emissões típicas de chaminés e exaustores isolados; e as fontes área para emissões próximas ao solo, como as veiculares, por não incluir o efeito de elevação da pluma. Ainda há a configuração volumétrica, aplicada para uma grande variedade de fontes industriais (USEPA, 2018a).

Pode-se notar no artigo de Heist et al (2013) que dois tipos de fontes do AERMOD com aplicações distintas apresentaram resultados próximos ao simular fontes veiculares. Neste sentido, é interessante verificar se o mesmo ocorre quando confrontadas a implementação de fontes tipo área e ponto em modelos. Dessa maneira, o presente trabalho apresenta uma comparação entre as estimativas de emissões do poluente Dióxido de Nitrogênio (NO₂), aplicada ao caso da Avenida Beira-Mar Norte, em Florianópolis, Brasil. Para tanto são utilizadas as configurações pontuais e área do AERMOD. Ainda, uma comparação entre a facilidade de aplicação (implementação) das duas configurações é efetuada, para subsidiar o processo decisório dos usuários do modelo.

OBJETIVO

Comparar o desempenho do AERMOD na estimativa de concentrações de NO₂ utilizando as configurações de fontes pontuais e área, para a simulação da dispersão de emissões veiculares.

MATERIAIS E MÉTODOS

O *AERMOD Modeling System* é composto por um pré-processador meteorológico (AERMET), um pré-processador de terreno (AERMAP) e um modelo de dispersão (AERMOD). Dados observacionais meteorológicos e de sondagem, combinados às características estimadas da superfície de estudo, foram pré-processadas utilizando o AERMET. Assim, o pré-processador forneceu os parâmetros da camada limite necessários ao AERMOD. Já a complexidade do terreno foi incorporada às simulações através do AERMAP, que forneceu a elevação da base de cada receptor e fonte. Os dados pré-processados foram incorporados ao AERMOD, juntamente com informações da área de estudo e emissões da sua frota veicular. Portanto os parágrafos desta seção discorrem sobre a área de estudo e sobre o pré-processamento e processamento de dados no modelo.

A área de estudo escolhida foi a Avenida Beira Mar Norte, que possui 5,91 km de extensão e localiza-se em Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. De acordo com o Censo Demográfico de 2010, a cidade é predominantemente urbana, possui 421.240 habitantes e 675.409 km² de território (IBGE, 2010). A Avenida é considerada a principal rota de acesso entre as porções insular e continental de Florianópolis, além de proporcionar área de recreação e prática de esportes em seu entorno.

O poluente simulado foi o NO₂, pela disponibilidade de dados de emissão na área de estudo. Conforme estimado por Maes e Hoinaski em 2017, os veículos que trafegaram na Avenida Beira Mar Norte emitiram 5,45 g/s de NO₂, entre 14 e 20 de dezembro de 2010 (MAES e HOINASKI, 2017). O estudo partiu de dados de

contagem veicular em toda a extensão da Avenida para proceder a estimativa. Como não ocorreu uma nova campanha de contagem veicular desde 2010, foi extrapolada a mesma taxa de emissão para o ano de 2015.

Os dados meteorológicos pré-processados pelo AERMET foram obtidos do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), para todo o ano de 2015, disponíveis em: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br/>>. Estes dados correspondem à estação SBFL, que apresentou predominância de ventos vindos do Norte, com velocidade até 8 m/s e 7,5% de calmos. Para o mesmo período, os dados de ar superior foram obtidos do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), disponíveis em: <<https://ruc.noaa.gov/raobs/>>. São dados provenientes da estação do Aeroporto Internacional Hercílio Luz, localizado em Florianópolis/SC (83899/SBFL).

As características da superfície denominadas albedo, razão de *Bowen* e rugosidade foram estimadas de acordo com a metodologia recomendada no documento *AERMET User's Guide* (USEPA, 2018b), levando em conta usos do solo e estação do ano.

Quanto aos dados do terreno, utilizou-se o modelo digital de elevação (MDE) da Região Sul de Santa Catarina, disponibilizado pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM/NASA), em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. A resolução espacial é de aproximadamente 30 metros. O MDE foi pré-processado no AERMAP.

Os receptores foram simulados por uma grade de 40.000 pontos, espaçados em 250 metros na direção horizontal e vertical, com elevação em relação ao nível do solo de 1,5 metro, simulando os indivíduos que transitam na Avenida.

Quanto às fontes, duas opções foram testadas: pontual e área. Para a configuração pontual, 109 fontes foram espaçadas em 50 metros ao longo da Avenida. Neste caso, a emissão total dos veículos foi dividida entre os 109 pontos. Em relação às fontes área, 30 polígonos com área total igual a 147.657,43 m² foram traçados ao longo das três vias da Avenida. Portanto, a taxa de emissão foi dividida pela área total dos polígonos.

Para ambas as fontes, verificou-se a excedência aos padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução CONAMA N° 03/1990. Para tanto, solicitou-se na rotina do AERMOD a ocorrência de concentrações acima dos padrões estabelecidos em Norma. A Tabela 1 indica os limites verificados:

Tabela 1: Padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA 03/1990, para NO₂.

Tempo de amostragem	Padrão primário (µg/m ³)	Padrão Secundário (µg/m ³)
1 hora	320	190
Média aritmética anual	100	100

Como a análise foi elaborada para o ano de 2015, utilizou-se a legislação vigente até então. É importante destacar que, a partir de 19 de novembro de 2018, a legislação foi atualizada pela Resolução CONAMA N° 491/2018, e padrões ainda mais restritivos foram determinados.

Para confrontar os resultados das fontes pontuais e área, utilizou-se como parâmetros de comparação, para cada caso: a) a área de abrangência das concentrações máximas horárias e anuais, e b) a frequência em que os padrões foram excedidos. Para o parâmetro a), utilizou-se como ferramenta o sistema de informação geográfica *ArcGIS*; e para o parâmetro b), foi utilizado o *software MATLAB*.

RESULTADOS OBTIDOS

Para avaliar os efeitos da poluição na Av. Beira Mar Norte e em suas proximidades, foram elaboradas as Figuras 1 e 2, que permitiram medir a área em que os padrões de qualidade do ar foram ultrapassados e verificar como a pluma do poluente NO₂ se dispersou em cada configuração.

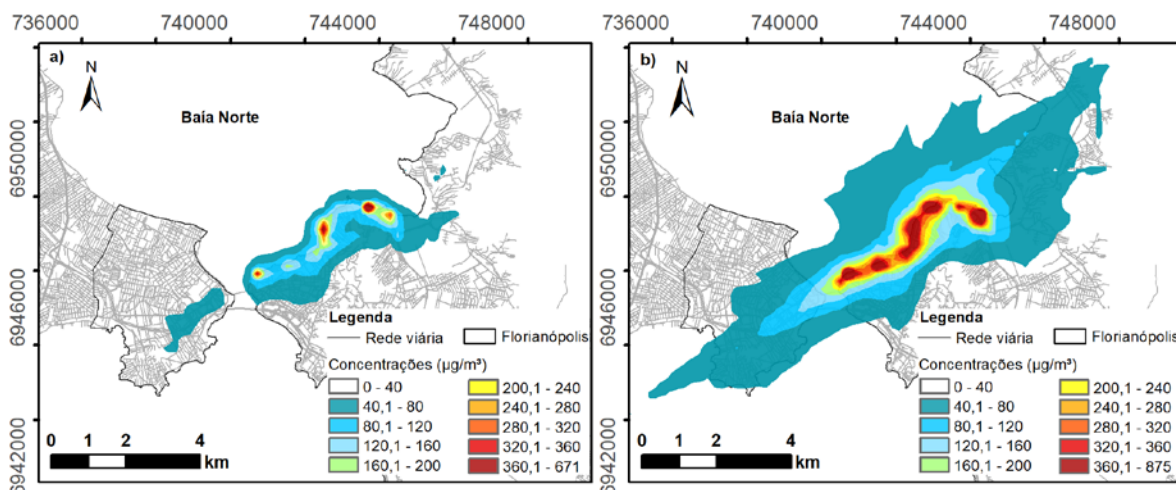


Figura 1: Concentrações máximas de NO₂ para o tempo de média de uma hora, provenientes de fontes pontuais (a) e área (b).

A Figura 1.a) apresenta 4 regiões em que as concentrações máximas horárias emitidas por fontes pontuais excederam o padrão primário de qualidade do ar, abrangendo 119.949,3 m², e o secundário, em 451.836,7 m². A pluma se estendeu ao longo de toda a Avenida. Já na Figura 1.b), as concentrações acima do padrão primário se estenderam por 880.478,5 m², e acima do secundário por 3.038.644,4 m². Nas duas configurações a pluma se dispersou, inclusive, para bairros longínquos.

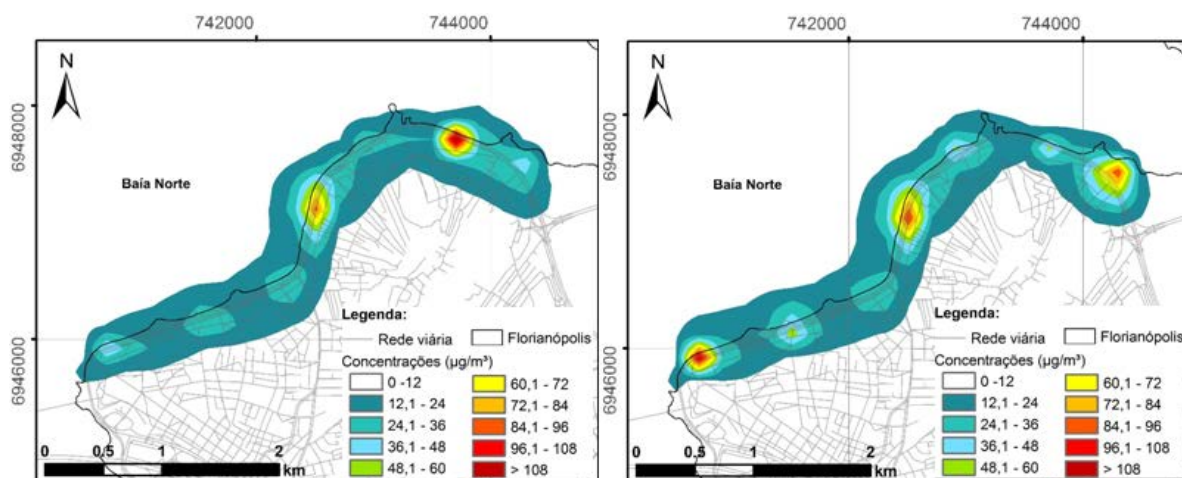


Figura 2: Concentrações médias aritméticas anuais de NO₂, provenientes de fontes pontuais (a) e área (b).

Na Figura 2.a), em que a média aritmética anual não deveria ultrapassar 100 µg/m³, observou-se que o padrão foi ultrapassado em duas regiões, com área total de 5.676,08 m². A Figura 2.b), elaborada com fontes área, resultou em uma área menor que ultrapassou o valor de referência de 100 µg/m³, totalizando 2.333,78 m² em três locais.

A Tabela 2 resume o alcance e a incidência das concentrações que ultrapassam os padrões de qualidade do ar. Em complemento às figuras, a Tabela 2 ainda mostra que o padrão primário de qualidade do ar foi ultrapassado 1519 vezes na representação por fonte pontual, e 3386 vezes por fontes área, mais do que o dobro. O secundário foi excedido 4152 vezes para a fonte pontual, e 9074 para a fonte área.

Tabela 1: resumo das concentrações máximas horárias encontradas (C_{max}), médias aritméticas anuais (MAA), abrangência em que os padrões primários e secundários são ultrapassados, e número de ocorrências que extrapolaram os padrões ao longo do ano, para fontes pontuais e área.

Tipo de Fonte	C_{max}	MAA	Ábrangência $C > 320 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Nº de eventos $C > 320 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Ábrangência $C > 190 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Nº de eventos $C > 190 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Ábrangência $C > \text{MAA}$
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(ha)	(un.)	(ha)	(un.)	(ha)
Pontuais	670,9	125,8	11,99	1519	45,18	4152	0,57
Área	875,7	116,10	88,04	3386	303,86	9074	0,23

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao comparar a Figura 1.a) e 1.b), percebe-se que as concentrações máximas horárias foram críticas em 4 localidades para as fontes pontuais, enquanto as emitidas por fontes área se estenderam ao longo da Avenida. Este comportamento depende diretamente do tratamento diferenciado de cada tipo de fonte e da distância a que os receptores se encontram da superfície. Haja vista que a configuração pontual considera a elevação da pluma, ela resulta em concentrações menores em alturas mais próximas da superfície. Já a forma área, por não incorporar a elevação da pluma, implica em concentrações maiores em receptores próximos do solo. Quando analisada a Figura 2 e o modelo de elevação SRTM/NASA, torna-se evidente que as regiões críticas causadas pelas fontes pontuais encontram-se adjacentes às áreas de maior elevação do terreno, configurando obstáculos.

Percebeu-se que em relação às fontes área, fontes pontuais subestimaram concentrações máximas horárias, resultando em um valor 23% menor. Esta diferença diminuiu consideravelmente quando foram analisadas médias aritméticas anuais, pois a MAA de fontes área foi 7,7% menor do que as pontuais. Em média, o número de eventos em desacordo com a legislação brasileira foi 121% maior no cenário área.

Em relação à facilidade de aplicação do modelo, o tempo de processamento computacional foi menor para as fontes pontuais. Isto pode estar relacionado à diferença que cada configuração tem em calcular as concentrações. De acordo com o manual de usuário do modelo, na configuração pontual utiliza-se a emissão de cada ponto emissor, em cada hora, para calcular as concentrações horárias por ponto receptor. As concentrações horárias calculadas para cada fonte e por receptor são somadas para obter o total produzido em cada receptor. Já a fonte área utiliza uma integração numérica da área nas direções a favor e contra o vento, resultando nas concentrações que chegam nos receptores (USEPA, 2004). É possível que, com o aumento da resolução da fonte pontual, os resultados das duas configurações se aproxime. Além disso, a preparação dos dados de entrada relativos às fontes e a elaboração da rotina do AERMOD, se não for feita de forma automatizada, também pode tornar a configuração de fontes área mais demorada. As fontes do tipo ponto ainda apresentam maior flexibilidade para alteração dos parâmetros de entrada, podendo ser interessantes quando as taxas de emissão variam ao longo da mesma via, como em intersecções viárias, por exemplo.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho utilizou-se o modelo AERMOD para analisar as concentrações de NO_2 emitidas por veículos no entorno da Av. Beira Mar Norte, em Florianópolis/SC. As rotinas foram elaboradas para configurações ponto e área, para avaliar a usabilidade dos dois tipos de fonte. Dentro destas configurações ainda avaliou-se a conformidade das concentrações encontradas com os padrões de qualidade do ar brasileiros.

De forma geral, é possível perceber que os cenários com fontes área produziram plumas com maior alcance do que as fontes pontuais. O mesmo aconteceu considerando apenas as concentrações máximas horárias que extrapolaram os limites de concentração. As fontes pontuais produziram picos em regiões distantes entre si; e as fontes área, ao longo de toda a Avenida. Atribuiu-se este comportamento ao tipo de tratamento da fonte, à elevação do receptor em relação à superfície, e ao número de pontos utilizados para representar as fontes veiculares.

A partir dos resultados gerados, as emissões veiculares da Avenida Beira Mar Norte têm potencial eminente de oferecer riscos à saúde da população na região, e ainda prejudicar a fauna e flora nos entornos. Portanto, é de suma importância que os efeitos epidemiológicos das emissões veiculares de NO₂ na Avenida sejam avaliados com profundidade.

Recomenda-se a modelagem de emissões veiculares com fontes pontuais por órgãos reguladores, como uma análise preliminar. Este tipo de configuração pode subsidiar a escolha de locais de monitoramento da qualidade do ar, e inclusive motivar estudos de impacto ambiental mais aprofundados. Por ser uma configuração com dados de entrada menos elaborados e que demanda menor tempo de processamento, pode ser útil em situações com maior abrangência de ruas. Em simulações que resultarem em valores que não ultrapassem as concentrações máximas horárias definidas em legislação, estimula-se que sejam refeitas com fontes área. Já para estudos de licenciamento ambiental, por exigirem uma abordagem mais conservadora, encoraja-se utilizar fontes área. Assim, a simulação com fontes pontuais, em alguns casos, pode ser uma opção acessível para agências ambientais e órgãos regulatórios que não possuam muitos recursos computacionais. Além disso, pode mostrar-se um tipo de fonte mais flexível quando as emissões veiculares variam ao longo da via.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Qualidade do ar no estado de São Paulo 2015. p. 156, 2016. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>>.
2. HEIST, D. et al. *Estimating near-road pollutant dispersion: A model inter-comparison. Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 25, p. 93–105, dez. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2013.09.003>>.
3. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2010. 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>>.
4. INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). Primeiro Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil. 2014. Disponível em: <<http://www.forumclima.pr.gov.br>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
5. INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IEMA). Inventário de emissões atmosféricas da Região da Grande Vitória. Vitória: [s.n.]. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/qualidadedoar>>. 2011.
6. MAES, A. de S.; HOINASKI, L. *Modeling the impacts of NO₂ vehicular emissions: A case study in Florianópolis, Brazil*. 2017, Vitória: Fundação Espírito Santense de Tecnologia, 2017. p. 130–132.
7. RÜCKERL, R. et al. *Health effects of particulate air pollution: A review of epidemiological evidence. Inhalation Toxicology*, v. 23, n. 10, p. 55–592, 2011.
8. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *UNEP year book: Emerging issues in our global environment*. Edição atualizada. Nairobi, Kenya: UNEP, 2014.
9. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)*. Research Triangle Park, Carolina do Norte: USEPA, 2018a.
10. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET)*. Research Triangle Park, Carolina do Norte: USEPA, 2018b.
11. VORMITTAG, E. M. P. A. de A. et al. Monitoramento da qualidade do ar no Brasil. Instituto Saúde e Sustentabilidade, p. 99, 2014.