



A POLUIÇÃO DO AR EM MICROAMBIENTES URBANOS NA MEGACIDADE DE SÃO PAULO: IMPACTOS NAS ESCALAS SEMANAL E SAZONAL

JULIO BARBOZA CHIQUETTO¹
MARIA ELISA SIQUEIRA SILVA²
¹JOSÉ ROBERTO ROZANTE³
ROBERT JOHN SWAP⁴

Resumo:

Análise de 16 anos de dados horários de O₃, CO, NO, NO₂ e MP₁₀ provenientes de quatro pontos de monitoramento na megacidade de São Paulo encontrou diferenças significativas (estatisticamente) nas concentrações dos poluentes de acordo com a classe de uso do solo urbano em ambas as escalas temporais avaliadas. Na escala diurna/semanal, as concentrações de CO e NO no ponto veicular são de duas a três vezes as do ponto de *background* urbano. Na escala sazonal, as concentrações de CO variaram em 70% devido ao uso do solo, comparado à 20% para o MP₁₀. As concentrações de O₃ e NO são afetadas expressivamente tanto pela variação sazonal como pelas diferenças de uso do solo.

Palavras-chave

poluição do ar urbana, uso do solo, monitoramento ambiental

Abstract:

Analysis of sixteen years of hourly O₃, CO, NO, NO₂ and PM₁₀ data from four monitoring points in the São Paulo megacity found (statistically) significant differences in pollutant concentrations according to urban land use class in both temporal scales. In the diurnal/weekly scale, CO and NO concentrations are two to three times higher in the vehicular point compared to the urban background point. In the seasonal scale, CO concentrations varied 70% due to land use, compared to 20% for PM₁₀. O₃ and NO concentrations are strongly impacted both by seasonal variation and land use differences.

Keywords:

Urban air pollution, land use, environmental monitoring

1 - Introdução

¹ Doutor em Geografia pela Universidade de São Paulo, julio22@usp.br

² Docente do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo; elisasiq@usp.br

³ Centro para Previsão de Tempo e Estudos Climáticos-CPTEC – INPE
roberto.rozante@cptec.inpe.br

⁴ Earth Sciences Division, Code 614, NASA, robert.j.swap@nasa.gov



Nas megacidades, cada vez mais adensadas, a gestão da poluição do ar se torna ponto chave na qualidade de vida e saúde de milhões de habitantes. Com mais de 20 milhões de habitantes e mais de 7 milhões de veículos, a megacidade de São Paulo é caracterizada por frequentes ultrapassagens dos Padrões de Qualidade do Ar, que levam à impactos negativos na saúde da população (CETESB, 2016, Gonçalves et al, 2005).

Em relação aos poluentes do ar, estima-se que 96% do monóxido de carbono (CO), 67% dos óxidos de nitrogênio (NO e NO₂) e 40% do material particulado inalável (MP₁₀) sejam emitidos pelo tráfego de veículos leves e pesados (CETESB, 2016). O ozônio (O₃), por outro lado, é formado por meio de reações que envolvem a radiação solar e poluentes precursores (NO₂ e Compostos Orgânicos Voláteis – COVs). No entanto, um ambiente saturado de poluentes precursores pode levar ao consumo de ozônio, tornando complexa a abordagem à poluente (Brasseur, G.P. et al., 1999). Estes dados sugerem que a emissão veicular, influenciada pelos padrões de uso do e ocupação solo na escala intraurbana, é de grande importância para a determinação da variação espaçotemporal da poluição atmosférica na megacidade de São Paulo nos diferentes microambientes urbanos.

1.1 - Objetivo

Uma vez que a emissão veicular é a principal fonte de poluentes em São Paulo atualmente, e tendo em vista que o uso e ocupação do solo variam espacialmente de forma heterogênea e complexa nas megacidades, este trabalho tem por objetivo avaliar as diferenças observadas na poluição do ar em diferentes microambientes urbanos e em diferentes escalas temporais. Diferentes tipos de uso e ocupação do solo, que variam expressivamente na escala intraurbana, produzem diferentes condições de superfície e emissão de poluentes por veículos, e estão associadas à diferentes condições de exposição (localização das fontes, distância das fontes emissoras, representatividade espacial) dentro de áreas urbanas complexas (OMS, 2000). Ao se conhecer o padrão do comportamento da poluição do ar em microambientes representativas de determinados tipos de uso e ocupação do solo, poder-se-á inferir potenciais impactos, na escala espacial intraurbana e em diferentes escalas temporais, advindos de intervenções urbanas, frutos, por exemplo, do planejamento ambiental ou mesmo da especulação imobiliária.

2 - Revisão Bibliográfica

Robustas pesquisas foram desenvolvidas sobre os impactos da poluição do ar na saúde (OMS, 2000), incluindo a área de estudo (Gonçalves et al., 2005), bem como de suas características meteorológicas e químicas (Alvim et al., 2016). No entanto, menos pesquisas



foram realizadas sobre as diferenças intraurbanas da poluição do ar, em especial sobre variações de uso do solo na complexa megacidade de São Paulo. Algumas pesquisas anteriores avaliaram diferenças na concentração de poluentes e variáveis atmosféricas na escala intraurbana e ressaltaram que o uso e ocupação do solo é fator essencial na investigação da composição e comportamento da atmosfera em escalas mais refinadas de análise (Szpiros et al., 2009; Levy et al., 2014). A relação entre concentrações de O₃ e a atividade urbana foi estudada em São Paulo, mas apenas na escala diurna (AZEVEDO, 2003). Conjuguar e integrar estes dados de forma interdisciplinar tem sido considerado cada vez mais importante pela comunidade científica internacional neste campo de estudo (Molina & Molina, 2004, Kraas & Mertins, 2014).

3 – Metodologia

Primeiramente, classificou-se as estações de monitoramento da CETESB utilizadas no estudo de acordo com critérios da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2000). Estes critérios são aplicados para se representar diferentes condições de exposição e representatividade espacial dentro dos microambientes urbanos, a saber: veicular, comercial, residencial e *background* urbano. A tabela 1 demonstra que há um gradiente (mais exposto->menos exposto) entre os pontos avaliados no sentido do quão diretamente eles são impactados pela emissão de poluentes veiculares: (mais exposto) veicular-comercial-residencial-*background* urbano (menos exposto).

Tabela 1: Características das estações utilizadas representando diferentes microambientes:

Uso do solo	Distância da emissão	Veículos/dia (300m)*	Descrição	Exposição potencial
Veicular (terminal de ônibus)	50m	770.000**	Impacto direto de vias com intenso fluxo de veículos	População em trânsito nas avenidas
Comercial (escola)	70m	297.000	Uso do solo misto e intensa atividade urbana	Pedestres, vendedores de rua
Residencial (praça)	150m	98.500	Afastado do centro, com atividade urbana moderada	Idosos ou crianças
Background urbano (parque)	400m	<50.000	Afastada das fontes de poluição.	Visitantes no parque, dano às plantas

*Dados da Companhia de Engenharia de Tráfego, CET, num raio de 300m do ponto.

**Incluindo ônibus do terminal Parque D. Pedro II, que impactam diretamente a estação.



Os dados utilizados foram séries temporais horárias, de 1996 a 2011, dos poluentes CO, NO, NO₂, O₃ e MP₁₀ dos quatro pontos de monitoramento da qualidade do ar da Companhia Ambiental de São Paulo (CETESB), a saber: terminal Parque D. Pedro II (veicular - VEIC), Mooca (comercial – COM, apenas dados de MP₁₀ e O₃), São Caetano do Sul (residencial - RES) e Parque Ibirapuera (*background* urbano – BU), disponíveis em <http://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do>.

Para os ciclos diurnos/semanais, calculou-se a média de cada poluente para determinado horário e dia da semana, iniciando na segunda-feira 00 horas até domingo às 23 horas, de forma a obter um ciclo semanal (sete dias) com resolução temporal de uma hora, que representa a média para aquele horário (figura 1). Nos ciclos sazonais, calculou-se a média da concentração dos três meses de cada estação do ano (verão - DJF, outono – MAM, inverno – JJA, primavera – SON), obtendo-se assim um único valor para cada estação do ano para cada poluente, em cada ponto. A comparação da influência da variação atmosférica e das diferenças de uso do solo na escala sazonal se deu por meio de manter um dos elementos e variar o outro (“manter a coluna e variar a linha”, e “manter a linha e variar a coluna”). Para se avaliar a importância da variação atmosférica sazonal em determinado ponto de monitoramento, comparou-se as variações sazonais (coluna) do poluente no mesmo ponto de monitoramento (linha). Para se ter a variação devido ao uso do solo em determinada estação do ano, comparou-se o poluente na mesma estação do ano (coluna) nos diferentes pontos de monitoramento (linha). Os resultados foram expressos em porcentagens (tabela 2)

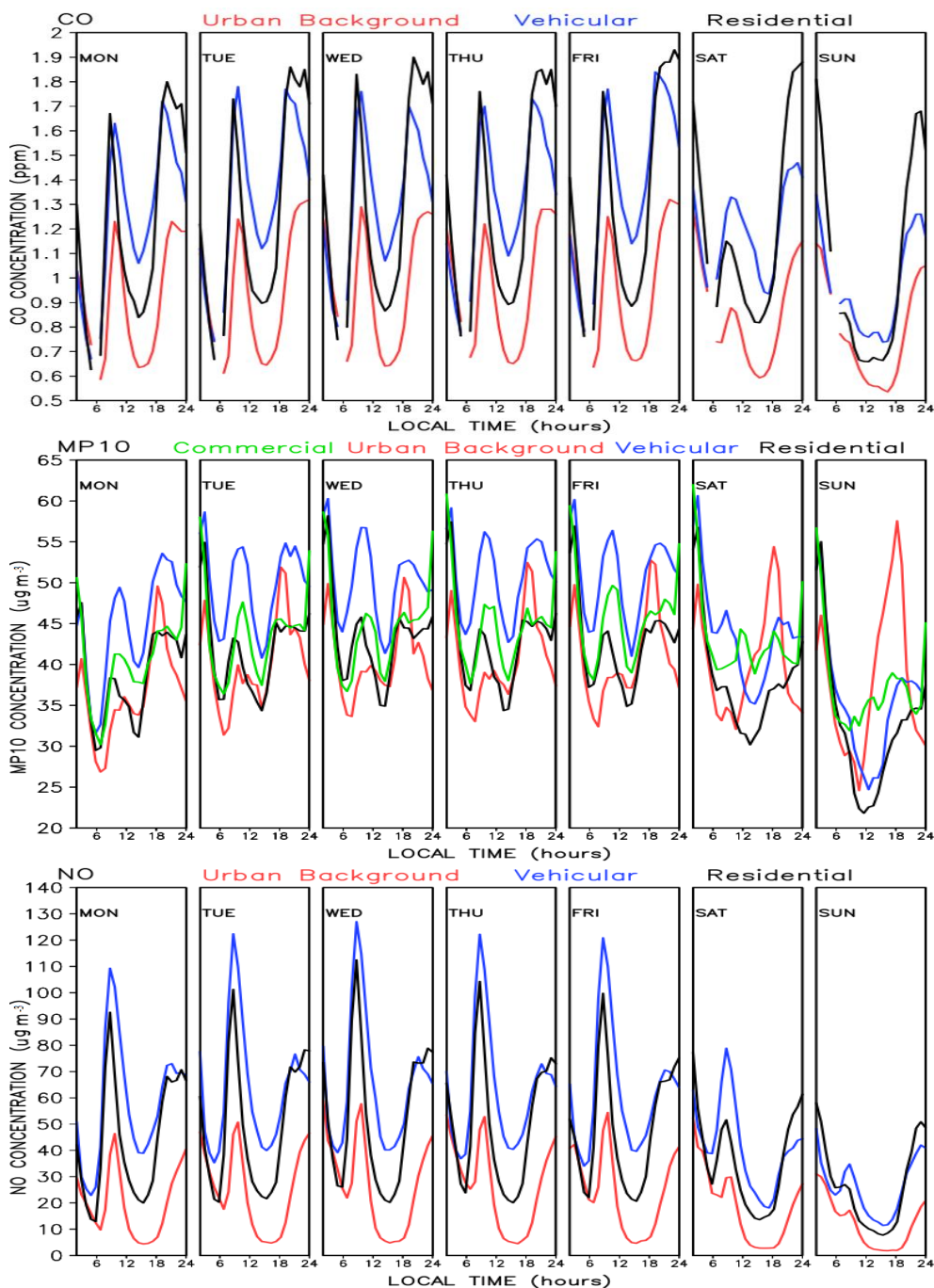
4 – Resultados

Os resultados indicam que as variações de uso do solo respondem por diferenças significativas entre as concentrações observadas em ambas as escalas temporais. A primeira escala temporal avaliada foi a escala diurna/semanal (figura 1).

Nota-se a emissão de poluentes por veículos no horário de maior trânsito da manhã (em especial o CO, NO e NO₂). À tarde ocorre diminuição das concentrações, provavelmente devido à expansão da camada limite causada pelo aumento de temperatura do ar, seguida por novo aumento devido à maior emissão no início da noite. O O₃ demonstra um padrão inverso aos outros poluentes, com um máximo à tarde devido à maior intensidade de radiação solar e maior disponibilidade de precursores. O MP₁₀ demonstra



um comportamento variado, influenciado pela emissão veicular e outros fatores, como a ressuspensão do solo. Nos finais de semana, devido à diminuição da atividade urbana, as concentrações são mais baixas e com padrão diferente dos dias de semana.



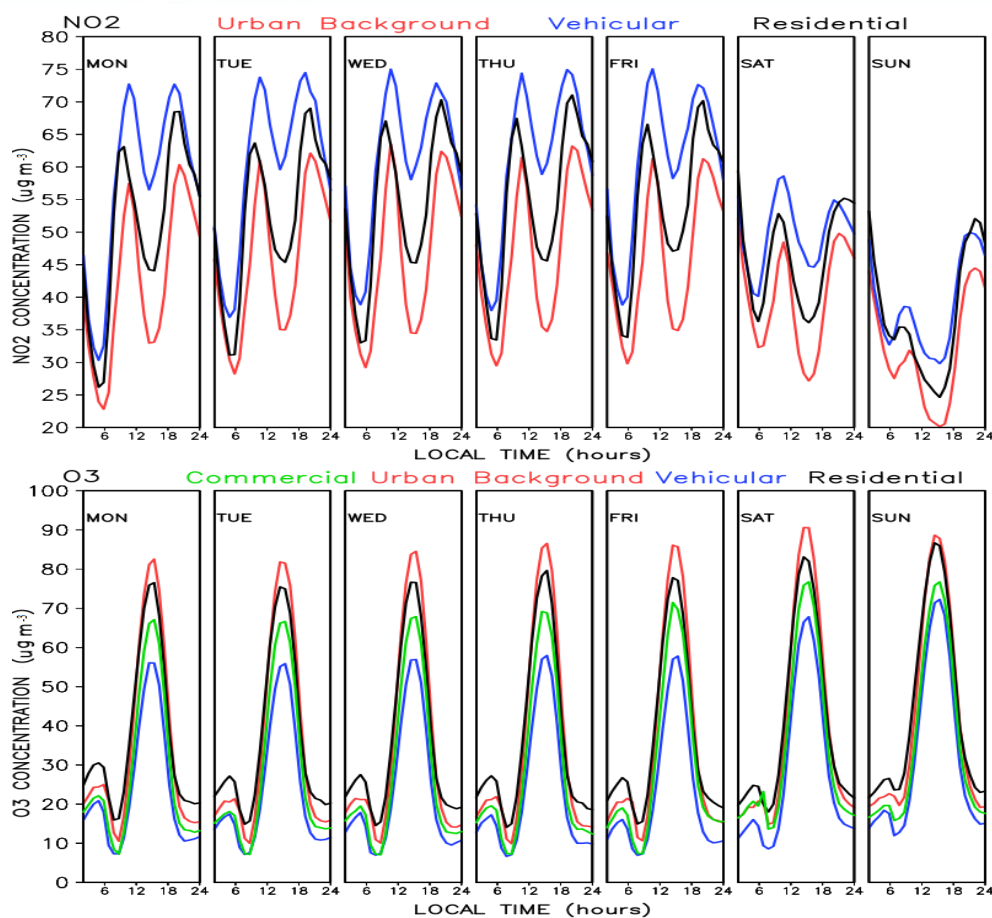


Figura 1: Ciclo semanal/diurno do CO, MP₁₀, NO, NO₂ e O₃, nesta ordem (nome do poluente no alto à esquerda de cada gráfico), nas localidades residencial (preto), veicular (azul), *background* urbano (vermelho) e comercial (verde – somente O₃ e MP₁₀).

O ciclo diurno/semanal de CO (primeira imagem) mostrou concentrações mais altas no ponto RES, caracterizado pelo uso intenso de veículos leves (que emitem mais CO do que veículos pesados). Trata-se de uma região caracterizada por moderado tráfego veicular e alto poder aquisitivo, e, portanto, a possibilidade de automóvel ou moto para uso particular. Concentrações intermediárias de CO são observadas no ponto VEIC, e mais baixas no BU.

Para o MP₁₀ (segunda imagem), ocorrem máximos associados à circulação de veículos, com concentração mais alta durante a manhã. No ponto BU, no entanto, os picos são mais altos à noite. Nas estações VEIC e RES, vê-se acentuada queda aos finais-de-semana. Já nas estações COM e BU, localizadas em áreas educacionais e de lazer, concentrações mais elevadas ocorrem aos finais-de-semana, associadas ao uso de espaços de lazer em campos e áreas de terra exposta em seus entornos.



Os ciclos diurnos/semanais de NO e NO₂ (terceira e quarta imagens) mostram que o ponto VEIC está mais exposto às emissões de veículos pesados (que emitem mais NO_x), provavelmente devido à influência do terminal de ônibus e do mercado municipal próximos. Concentrações intermediárias ocorrem no ponto RES, e as mais baixas, no BU.

No entanto, no ciclo do O₃ (última imagem), concentrações mais altas ocorrem nas estações RES e BU. Isto pode estar associado ao consumo de O₃ em regiões saturadas por NO_x e VOCs (Azevedo, 2003, Brasseur et al., 1999), como ocorre nas estações VEIC e COM. Concentrações altas de O₃ persistem nos finais-de-semana, o que chama a atenção do ponto de vista da saúde pública, pois é quando o maior número de visitantes está presente no parque Ibirapuera (mais de 200.000 pessoas em um final de semana).

As diferenças entre as estações se mostraram estatisticamente significativas entre todas as estações e poluentes avaliados no nível de 95%. Coeficientes de correlação de 0,26 entre os ciclos de MP₁₀ e NO₂ foram encontrados no ponto VEIC, e de 0,21 no ponto RES. Já entre o MP₁₀ e o CO, esse índice foi de 0,47 no ponto RES, e 0,43 no ponto VEIC. Isto sugere que a poluição por MP₁₀ está mais associada à veículos pesados no ponto VEIC e à veículos leves no ponto RES. Depois destes procedimentos, avaliou-se a variação sazonal dos poluentes, comparando a influência das variações atmosféricas e a influência por uso do solo.

Tabela 2: Comparação das influências do uso do solo (US) (azul, à direita) e das variações atmosféricas sazonais (ATM) (vermelho, abaixo de cada caixa) nas médias sazonais, para cada estação do ano e ponto de monitoramento.

Estação	VEIC	COM	BU	RES	Diferença US	
O₃						
Concentração (ppb)	Verão	27 (±8)	33.5 (±5)	38.4 (±9)	41.1 (±10)	53%
	Outono	25.7 (±10)	25.7 (±7)	32.9 (±9)	33.7 (±8)	31%
	Inverno	19.4 (±6)	22.5 (±7)	30.9 (±9)	31.3 (±9)	62%
	Primavera	27.6 (±9)	37 (±5)	43.1 (±8)	44.1 (±10)	60%
<i>Diferença ATM</i>		<i>39%</i>	<i>64%</i>	<i>39%</i>	<i>41%</i>	
MP₁₀						
Concentração (µg m ⁻³)	Verão	35.8 (±8.7)	31.5 (±7)	30 (±7)	31.6 (±5)	19%
	Outono	43.3 (±14)	38.7 (±12)	37.2 (±8)	37 (±8)	17%
	Inverno	64.7 (±15)	59.6 (±18)	52.7 (±12)	54.1 (±11)	22%



	Primavera	42.9 (±12)	41.7 (±14)	37.1 (±10)	37.3 (±7)	15%
	<i>Diferença ATM</i>	80%	89%	75%	71%	
NO₂						
Concentração (ppb)	Verão	47.7 (±21)	-	34.4 (±15)	43 (±19)	39%
	Outono	52.6 (±20)	-	40.6 (±14)	47.3 (±18)	30%
	Inverno	66.9 (±27)	-	53.4 (±20)	62 (±25)	25%
	Primavera	55 (±22)	-	42 (±18)	47.2 (±19)	31%
	<i>Diferença ATM</i>	40%	-	55%	44%	
NO						
Concentração (ppb)	Verão	37.9 (±25)	-	10 (±4)	27.3 (±9)	279%
	Outono	49.9 (±27)	-	18.4 (±11)	39.9 (±16)	171%
	Inverno	85.4 (±34)	-	43.7 (±19)	73.2 (±17)	95%
	Primavera	38 (±25)	-	12 (±8)	30 (±12)	217%
	<i>Diferença ATM</i>	125%	-	335%	168%	
CO						
Concentração (ppm)	Verão	1.13 (±0.5)	-	0.74 (±0.1)	1.01 (±0.3)	65%
	Outono	1.14 (±0.4)	-	0.86 (±0.2)	1.17 (±0.3)	73%
	Inverno	1.61 (±0.5)	-	1.22 (±0.3)	1.67 (±0.5)	73%
	Primavera	1.11 (±0.4)	-	0.80 (±0.2)	1.10 (±0.3)	72%
	<i>Diferença ATM</i>	45%	-	62%	64%	

Nota-se que os poluentes apresentam concentrações mais altas no período de inverno, associadas às condições de maior estabilidade atmosférica, ao passo que as condições mais instáveis do verão propiciam concentrações mais baixas. O ozônio demonstra um ciclo diferente, com mínimos no outono/inverno e máximos na primavera, de acordo com a variação sazonal da radiação solar. Comparando-se a variação atmosférica com a diferença devido ao uso do solo para este poluente, nota-se que esta é ligeiramente mais alta, em torno de 50 a 60% (exceto no outono), comparadas à variação sazonal, em torno de 40% (exceto no ponto COM, caracterizado por uso do solo misto e maior variabilidade sazonal).

O ciclo sazonal do CO também demonstra uma influência ligeiramente maior do uso do solo, com variações de até 70% devido à este fator. As variações sazonais são da ordem de 60%, exceto no ponto de monitoramento VEIC, devido ao impacto direto das fontes



emissoras. Mesmo sendo um poluente veicular primário menos reativo, este estudo e outros sugerem que há uma variação espacial significativa na escala intraurbana (Weng & Yang, 2006).

Já para o NO, as diferenças sazonais são comparáveis às variações por uso do solo, embora muito mais intensas devido à maior reatividade deste poluente. Pandey et al., 2008 observaram concentrações 4 vezes mais altas num local rural comparado à um local veicular. Neste estudo, o ponto VEIC tem concentrações quase três vezes mais altas do que o BU no verão. No ponto BU, as concentrações de inverno são 3,5 vezes mais altas do que as de verão, demonstrando que tanto as características de uso do solo como as variações sazonais são relevantes para este poluente.

Já para os poluentes MP10 e NO₂, as diferenças sazonais (70% para o MP10 e 50% para o NO₂) são mais significativas do que as induzidas pelo uso do solo (20% para o MP e 30% para o NO₂), especialmente para o MP10. Isto demonstra que a diversidade de fontes de particulado (queima de biomassa, ressuspensão do solo, reações do particulado secundário, transporte em escala regional) têm um papel mais relevante na concentração deste poluente na escala sazonal do que os impactos diretos da emissão veicular. Para o NO₂, estes resultados sugerem a relevância da sua fração secundária na área de estudo.

5 – Considerações Finais (ou Conclusões)

O estudo realizado objetivou avaliar a influência do uso do solo, em diferentes microambientes urbanos, sobre a poluição do ar na escala diurna e na escala sazonal, usando médias de mais de quinze anos de medições. Pôde-se observar, pelos resultados obtidos, que o uso do solo determina diferenças significativas (estatisticamente) na concentração dos poluentes em cada localidade, variando de acordo com o poluente, o local, e a escala temporal avaliada. Para os poluentes CO, NO e O₃, o uso do solo impacta as concentrações de poluentes tanto quanto as variações atmosféricas diurnas ou sazonais médias. Para o MP10 e o NO₂, as variações atmosféricas são mais relevantes. É de suma importância que as autoridades considerem estas variações intraurbanas da poluição do ar nas megacidades nos diferentes microambientes urbanos ao planejar intervenções na estrutura urbana ou na qualidade do ar.

Bibliografia



ALVIM, D. S., GATTI, L. V., CORRÊA, S. M., CHIQUETTO, J. B., DE SOUZA ROSSATTI, C., PRETTO, A., ... SANTOS, G. M. Main ozone-forming VOCs in the city of Sao Paulo: observations, modelling and impacts. **Air Quality, Atmosphere & Health**, 2016

AZEVEDO T. R. O ritmo da atividade urbana e a concentração de ozônio na camada de mistura na região metropolitana de São Paulo e arredores. **X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003

BRASSEUR, G.P., ORLANDO, J.J., & TYNDALL, G.S. **Atmospheric Chemistry and Global Change**. Oxford University Press, 1999.

CETESB. **Relatório de Qualidade do Ar do Estado de São Paulo de 2015**, 2016.

GONÇALVES, F. L. T., CARVALHO, L. M. V., CONDE, F. C., LATORRE, M. R. D. O., SALDIVA, P. H. N., & BRAGA, A. L. The effects of air pollution and meteorological parameters on respiratory morbidity during the summer in São Paulo City. **Environment International**, 31(3), 343–349, 2005.

KRAAS, F., & MERTINS, G. MEGACITIES AND GLOBAL CHANGE. In F. Kraas, S. Aggarwal, M. Coy, & G. Mertins (Eds.), **Megacities** (pp. 1–6). Ed. Springer, Holanda, 2014.

LEVY, I., MIHELE, C., LU, G., NARAYAN, J., HILKER, N., & BROOK, J. R. Elucidating multipollutant exposure across a complex metropolitan area by systematic deployment of a mobile laboratory. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 14(14), 7173–7193, 2014

MOLINA, M. J., & MOLINA, L. T. Megacities and Atmospheric Pollution. **Journal of the Air & Waste Management Association**, 54(6), 644–680, 2004.

OMS (Organização Mundial da Saúde) (Ed.). Air quality guidelines for Europe (2. ed). Copenhagen: **World Health Organization**, Regional Office for Europe., 2000.

PANDEY, S. K., KIM, K.-H., CHUNG, S.-Y., CHO, S.-J., KIM, M.-Y., & SHON, Z.-H. Long-term study of NO_x behavior at urban roadside and background locations in Seoul, Korea. **Atmospheric Environment**, 42(4), 607–622, 2008.

SZPIRO, A. A., SAMPSON, P. D., SHEPPARD, L., LUMLEY, T., ADAR, S. D., & KAUFMAN, J. D. Predicting intra-urban variation in air pollution concentrations with complex spatio-temporal dependencies. **Environmetrics**, 2009.

WENG, Q., & YANG, S. Urban Air Pollution Patterns, Land Use, and Thermal Landscape: An Examination of the Linkage Using GIS. **Environmental Monitoring and Assessment**, 117(1–3), 463–489. 2006.