



Universidade Federal do ABC

Between the Local and the Regional

A Multiscale Analysis of Urban Air Pollution in São Paulo

Marco Antonio Portugal — Centro Universitário FEI

Urban Climate, vol. 67, 2026, 102932 (Elsevier) · Janeiro 2015 – Setembro 2025

[Link do Artigo para Download](#)

M.Sc. Rodrigo Sagaseta de Oliveira Souza

Doutorando em Engenharia da Informação

Ciências Ambientais - Apresentação dia 03 de Julho de 2026



Contexto e Relevância

O problema

A poluição do ar é um dos principais riscos ambientais à saúde em áreas urbanas. As abordagens tradicionais focam em determinantes locais — densidade urbana e tráfego intraurbano — mas evidências crescentes demonstram a insuficiência desse quadro em metrópoles inseridas em economias altamente integradas.

Por que São Paulo?

São Paulo é o principal hub financeiro, logístico e de consumo do Brasil. Sua qualidade do ar reflete não apenas dinâmicas urbanas locais, mas interdependências econômicas e territoriais em escala regional. O estudo se alinha ao **ODS 11.6.2*** — monitoramento de níveis urbanos de partículas inaláveis.

***ODS 11.6.2:** Indicador que monitora níveis urbanos médios de partículas inaláveis **PM10** (Material particulado inalável grosso, associado a processos físicos locais como ressuspensão de poeira e construção civil) e **PM2.5** (Material particulado fino associado a processos de combustão e transporte regional de poluentes)

Questão de Pesquisa e Hipóteses

H1 - Atividade Urbana Local

Concentrações de PM10 estão predominantemente associadas à poluição de base local — construção civil, degradação de superfícies e intervenções de manutenção urbana.

H2 - Escala Energética e Transregional

A dinâmica do PM2.5 está associada à poluição de base sistêmica — processos de combustão e logística dependente de diesel, operando além dos limites municipais.

H3 - Modulação Sistêmica

Os efeitos dos fluxos logísticos sobre PM2.5 não são lineares: são condicionados pela interação entre ciclos produtivos regionais do setor primário e a circulação de bens.

Metodologia - Delineamento da Pesquisa

Abordagem e Recorte

Estudo quantitativo longitudinal abrangendo **janeiro de 2015 a setembro de 2025**. O recorte espacial concentra-se no **Eixo Centro-Oeste de São Paulo**, com dados das estações de monitoramento da CETESB: Pinheiros, Cerqueira César e Marginal Tietê.

Os dados foram agregados em escala mensal pelo critério do **"pior caso"** (valor máximo entre as estações). Falhas nas séries foram tratadas por interpolação de tendência linear.

Estratégia Analítica em 3 Estágios

01 - Estatística Descritiva

Caracterização das distribuições e padrões de sazonalidade das variáveis.

02 - Correlação Exploratória

Análise das associações bivariadas entre poluentes e preditores candidatos.

03 - Regressão Múltipla (HAC)

Estimador Newey-West para correção de autocorrelação e heterocedasticidade.

Metodologia - Variáveis do Estudo

As variáveis foram selecionadas como proxies para capturar processos operando em diferentes escalas territoriais, desde intervenções municipais até dinâmicas logísticas e agrícolas regionais.

Variável	Proxy Para	Escala	Fonte
PM10 e PM2.5	Indicadores de poluição atmosférica	Local	CETESB
Consumo de cimento	Intensidade da construção civil	Local	CBIC
Vendas de diesel	Tráfego pesado e logística	Regional	ANP
Gasolina e etanol	Tráfego de veículos leves	Local/Regional	ANP
Eletricidade industrial	Atividade industrial	Regional	EPE
Área plantada	Uso do solo agrícola	Regional	IBGE
FRP (fogo)	Intensidade de queimadas	Regional	INPE
Resíduos de varrição	Esforço de limpeza urbana	Local	PMSP
Demandas SP156	Percepção de falhas na manutenção	Local	PMSP
COVID-19 (dummy)	Controle para 2020–2021	—	Própria

Resultados - Estatística Descritiva

As séries temporais revelam elevadas concentrações médias e picos expressivos, com ambos os poluentes sistematicamente acima dos limites recomendados pela OMS ao longo do período analisado.

28,15

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ — PM10

Média mensal; máximos acima de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Limite OMS: $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

18,02

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ — PM2.5

Média mensal; máximo de $37,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
Concentrações 3–4× acima do limite OMS ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

1,65B

Litros/mês — Diesel

Volume médio de vendas mensais de diesel no estado de São Paulo.

130K

MW médios — FRP

Potência Radiativa do Fogo; alta variabilidade (desvio padrão de 420.576 MW).

 Concentrações anuais de PM2.5 entre 3 e 4 vezes acima do limite da OMS ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) — sinal de urgência para políticas públicas.

Resultados - Correlações e Séries Temporais

Sazonalidade

As séries exibem **ciclos recorrentes de aumento nos meses de inverno** (junho–agosto), período associado à menor precipitação, inversões térmicas e intensificação das queimadas no interior do estado e no Cerrado.

A persistência do PM2.5 mesmo durante a pandemia reforça a hipótese de que seus determinantes operam em escalas que transcendem a mobilidade urbana local.

Padrões de Associação

PM10 ↔ PM2.5

Alta correlação positiva — co-movimento temporal consistente ao longo da série.

FRP e Poluentes

Queimadas correlacionam mais com PM10 ($r = 0,50$) do que com PM2.5 ($r = 0,38$).

SP156 (Demandas)

Correlação negativa com ambos os poluentes — manutenção associada a menores concentrações.

COVID-19

Redução perceptível em PM10, mas PM2.5 manteve níveis relativamente persistentes.

Regressão para PM10 - Base Local



Poder Explicativo

O modelo explica aproximadamente **45%** da variância observada nas concentrações de PM10.

Cimento (H1 ✓)

Coefficiente positivo, **estável e estatisticamente significativo**. Principal preditor de PM10 — corrobora a hipótese de base local.

SP156 — Manutenção

Coefficiente **negativo e significativo**: maior demanda por manutenção urbana está associada a menores concentrações de PM10.

Varrição

Sinal negativo, porém **sem significância estatística consistente** nos modelos estimados.

PM10 responde predominantemente a processos físicos e operacionais de escala local — construção civil e gestão da infraestrutura urbana.

Regressão para PM2.5 - Base Sistêmica



Desempenho do Modelo

O modelo explica entre 47% e 50% da variância de PM2.5 — desempenho superior ao modelo para PM10, sugerindo maior estrutura sistemática nos dados.

Achado Central - H3 Corroborada

O termo de interação diesel $\times$ área plantada é positivo e estatisticamente significativo ($p = 0,007$). O diesel isoladamente apresenta direção positiva com significância marginal ($p = 0,058$).

Efeitos Marginais Condicionais

↔ Baixa área plantada

Impacto marginal do diesel sobre PM2.5 é reduzido e não significativo.

↔ Alta área plantada

O efeito marginal do diesel torna-se progressivamente mais intenso e estatisticamente significativo.

A associação entre consumo de diesel e PM2.5 se intensifica em períodos de maior atividade agrícola regional — evidência empírica da hipótese de modulação sistêmica.

Discussão - Validação das Hipóteses

H1 - Corroborada

PM10 de base local.

Consumo de cimento como preditor estável. Manutenção urbana (SP156) como potencial mitigador. Políticas municipais são eficazes para este poluente.

H2 - Parcialmente Corroborada

PM2.5 de base sistêmica.

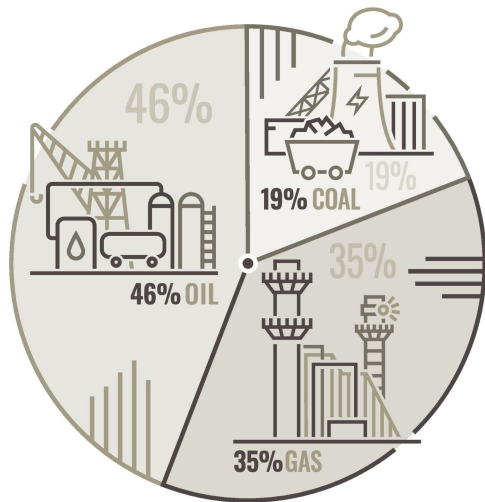
Evidência sugestiva, mas limitada pela impossibilidade de separar integralmente o diesel regional do diesel de uso urbano.

H3 - Corroborada

Modulação sistêmica. Termo de interação significativo. A análise de efeitos marginais condicionais fornece a evidência mais robusta do estudo.

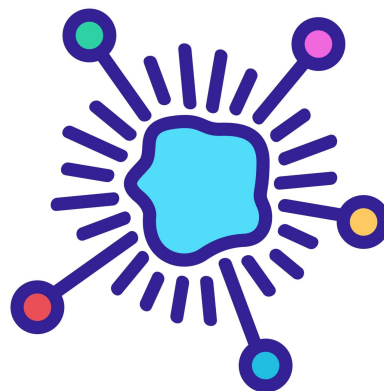
Contribuição conceitual central: a distinção entre **poluição urbana de base local** e **poluição urbana de base sistêmica**. Atividades produtivas espacialmente externas à metrópole — como a produção agrícola regional — exercem influência indireta, porém decisiva, sobre a qualidade do ar urbano quando mediadas por estruturas logísticas intensivas em combustíveis fósseis.

Implicações para Políticas Públicas



Gestão Municipal - PM10

PM10 responde a intervenções locais: varrição mecânica, controle de obras, manutenção de pavimento. **Políticas municipais podem ser eficazes** para reduzir exposição a PM10.



Coordenação Interfederativa - PM2.5

PM2.5 demanda articulação entre escalas urbana, energética, logística e territorial. Instrumentos exclusivamente locais são **insuficientes** para este poluente.



“Safrá sobre Rodas”

A produção agrícola regional emerge como determinante indireto da poluição urbana. O Brasil ainda não reporta sistematicamente dados de qualidade do ar conforme o **ODS 11.6.2**.

Conclusões

Principais Achados

Casualidade Multiscalar

A qualidade do ar em São Paulo resulta da sobreposição de mecanismos causais distintos — locais para PM10, sistêmico-regionais para PM2.5.

Contribuição Conceitual

Suporte empírico à distinção entre poluição de base local e de base sistêmica em cidades do Sul Global.

Modulação não Linear

O efeito do diesel sobre PM2.5 é condicionado pelo ciclo agrícola regional — evidência robusta da interação sistêmica.

Limitações e Agenda Futura

Limitações Reconhecidas

Variáveis meteorológicas não incorporadas; proxies indiretas; associações condicionais, não relações causais diretas.

Próximos passos

Integração de dados climáticos, inventários de emissões mais granulares e análises comparativas entre metrópoles do Sul Global.

A gestão eficaz da qualidade do ar urbano requer arranjos de governança capazes de articular políticas urbana, energética, logística e territorial de forma integrada.

Siglas e Acrônimos

Poluentes e Indicadores Ambientais

Sigla	Significado	Definição
PM10	Particulate Matter $\leq 10 \mu\text{m}$	Material particulado inalável grosso, associado a processos físicos locais (ressuspensão de poeira, construção civil)
PM2.5	Particulate Matter $\leq 2,5 \mu\text{m}$	Material particulado fino, associado a processos de combustão e transporte regional de poluentes
FRP	Fire Radiative Power	Potência Radiativa do Fogo — proxy para intensidade de queimadas e emissões por biomassa

Siglas e Acrônimos

Instituições e Órgãos

Sigla	Significado
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PMSP	Prefeitura do Município de São Paulo
OMS	Organização Mundial da Saúde
WHO	World Health Organization (OMS, em inglês)

Siglas e Acrônimos

Hipóteses da Pesquisa

Sigla	Significado
H1	Hipótese 1 — Atividade Urbana Local (associação do PM10 com fontes locais)
H2	Hipótese 2 — Escala Energética e Transregional (associação do PM2.5 com processos regionais de combustão)
H3	Hipótese 3 — Modulação Sistêmica (interação entre diesel e ciclos produtivos regionais)

Unidades de Medida

Sigla	Significado
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Micrograma por metro cúbico (concentração de poluentes no ar)
MW	Megawatt (potência radiativa do fogo)
MWh	Megawatt-hora (consumo de energia elétrica)