

PORTUGUÊS INTENSIVO II - INTERNACIONALIZAÇÃO

Membros:

[Karen Daniela Marin Baez](#)

[Johann Camilo Rincon Real](#)

Modelagem preditiva e análise físico-estatística da poluição atmosférica e desigualdade ambiental em Bogotá

-

O ar que respiramos e as desigualdades que não vemos: modelagem preditiva de PM_{2,5} em Bogotá

Tema: A poluição do ar em Bogotá, especialmente a alta concentração de material particulado (PM_{2.5}), representa um problema crítico para a saúde pública dos bogotanos. No entanto, partimos da hipótese de que o impacto dessa poluição não é uniforme: em zonas socialmente mais vulneráveis, o risco de exposição é significativamente maior, refletindo uma possível desigualdade ambiental estrutural. Por esta razão, o objetivo é aplicar uma análise físico-estatística para desenvolver um modelo preditivo baseado em séries temporais, que não somente antecipe os picos de poluição, mas também revele padrões espaciais e sociais de exposição desigual. Em outras palavras, usamos a física e a estatística — com foco em indicadores sociais, mapas de dispersão e modelagem temporal — para oferecer uma reflexão social informada e alimentada pela ciência, com dados reais.

Perguntas norteadoras:

- Quais são os principais padrões espaciais e temporais da concentração de material particulado (PM_{2.5}) em Bogotá, e como eles se relacionam com as variáveis climáticas da cidade (vento, chuva, temperatura)?
- Como a física da dispersão atmosférica, considerando a topografia de Bogotá, pode auxiliar na identificação das zonas urbanas mais propensas à acumulação de poluentes?
- De que maneira a análise estatística, combinando séries temporais e indicadores sociais (densidade populacional, renda, acesso à saúde), pode verificar se há uma relação entre vulnerabilidade socioeconômica e maior risco de exposição à poluição?
- Como o modelo preditivo resultante pode ser utilizado como uma ferramenta de justiça ambiental, capaz de orientar decisões baseadas em evidências e reduzir desigualdades na exposição à poluição atmosférica?

Resumo:

Em Bogotá, a poluição do ar é a manifestação diária de uma desigualdade social que também se respira. A gestão reativa da cidade, que age somente após a crise, cobra um preço mais alto da saúde das comunidades historicamente mais vulneráveis. Nosso projeto nasce dessa urgência, usando a ciência como uma ferramenta de equidade.

A intenção é integrar a física e a estatística para investigar este fenômeno: com os modelos da física, mapeamos as zonas onde a poluição se concentra perigosamente; e com a estatística, aplicamos séries temporais e indicadores sociais para verificar se há correlação entre vulnerabilidade e exposição à poluição. A integração dos métodos busca revelar um padrão claro: o risco não é democrático.

Acreditamos que compreender é também intervir: ao quantificar e modelar, não somente descrevemos fenômenos físicos, mas revelamos como os dados podem evidenciar desigualdades sociais invisíveis. Por isso, nosso trabalho não é apenas técnico — é científico no sentido mais amplo, pois busca entender, com profundidade e responsabilidade, como a física e a estatística podem iluminar a realidade humana.

➤ Pesquisa bibliográfica e em mídias

Para contextualizar o problema, a pesquisa inicial seguiu duas direções. A análise de fontes da mídia foi usada para compreender a dimensão social e o debate público sobre a poluição em Bogotá. Ao mesmo tempo, a revisão da literatura científica serviu para fundamentar a abordagem técnica do estudo, centrada na dispersão de poluentes e na análise de séries temporais

Bogotá tem uma infraestrutura de monitoramento rara na região (**RM CAB**, ~20 estações desde **1997**) e ampla produção científica local. As evidências convergem para **exposição desigual ao PM_{2,5}**: a zona sudoeste (Kennedy, Ciudad Bolívar, Tunjuelito) apresenta 26–29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, afetando desproporcionalmente ~1,6 milhão de moradores de estratos 1–3. Crianças de estratos baixos enfrentam exposição até 10× maior acima de padrões em relação às de estratos altos. A cidade já possui capacidade institucional (SIMCAB, IBOCA, SATAB) — a contribuição diferencial do projeto é injetar justiça ambiental nesses sistemas.

○ Mídia:

- **Por que a qualidade do ar em Bogotá não melhora? (Link: <https://www.youtube.com/watch?v=Q9LvWGEuDCQ>)**

Este vídeo explica que, mesmo com menos carros circulando, a qualidade do ar em Bogotá continua ruim devido a fatores externos, como a fumaça de queimadas vindas dos Llanos Orientales, que é transportada pelo vento até a cidade. A situação mantém a cidade em alerta, com a esperança de que as chuvas ajudem a diminuir a poluição.

- **Qualidade do ar em Bogotá não recupera níveis normais (Link: https://www.youtube.com/watch?v=tH_GlvExiA4)**

A reportagem mostra que as medidas de restrição de tráfego ("pico y placa") não são suficientes para resolver o problema da poluição do ar. Especialistas apontam que a causa principal não são os carros particulares, mas sim os veículos de carga pesada a diesel e as indústrias com pouco controle de emissões, que continuam a operar.

- **Qualidade do ar. Ônibus, indústria e uma má cultura ambiental** (Link: https://www.youtube.com/watch?v=u8DDK9j_DSE)

Nesta análise da Universidade Nacional da Colômbia, especialistas aprofundam a discussão, explicando que o poluente mais preocupante na região é o material particulado (PM2.5), emitido principalmente por ônibus, caminhões e pela indústria. Eles destacam que a falta de monitoramento contínuo e a ausência de vontade política para aplicar soluções de longo prazo são os maiores obstáculos para uma melhora efetiva

- **Quais são as condições da qualidade do ar em Bogotá?** (Link: <https://www.youtube.com/watch?v=hJX-3rWqLbs>)

Uma especialista entrevistada pela Rádio Nacional da Colômbia reitera que o transporte é o principal responsável pela má qualidade do ar em Bogotá, devido à alta emissão de material particulado. Ela também menciona o impacto da indústria e do comércio, e sugere que os cidadãos contribuam diminuindo o uso de veículos e denunciando fontes claras de poluição, como as queimadas

- **Qualidade do ar** (Link: <https://www.youtube.com/watch?v=XIjCffuxyTc>)

Este vídeo, produzido pela Universidade Nacional da Colômbia (UNAL), explica de forma didática os conceitos básicos da poluição atmosférica. Ele diferencia as fontes naturais (como vulcões) das humanas (veículos, indústrias) e classifica os tipos de poluentes. O caso da cidade de Manizales é usado para ilustrar como a geografia local, como a topografia montanhosa e ventos fracos, pode dificultar a dispersão dos poluentes e agravar o problema.

○ **Literatura**

científica:

- **WRF-Chem em Bogotá (PM10)** — comparação de esquemas químicos, base metodológica local:
Kumar et al., 2016, *Aerosol and Air Quality Research*. DOI: [10.4209/aaqr.2015.05.0318](https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0318)
- **Inventário abrangente de emissões (Bogotá 2012)** Pachón et al., 2018, *Atmosphere*. DOI: [10.3390/atmos9020049](https://doi.org/10.3390/atmos9020049)
- **Alerta precoce PM10/PM2,5 com WRF-Chem** — episódios de 14–15/fev/2019:
Environmental Science and Pollution Research. DOI: [10.1007/s11356-019-06997-9](https://doi.org/10.1007/s11356-019-06997-9)

○ **Análise** **espaço-temporal** **e** **desigualdade:**

- **Krigagem espaço-temporal + covariáveis sociais** — mapas detalhados e métrica de desigualdade:
Jin et al., 2022, *Frontiers in Environmental Science*. link:
<https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2022.966560/full>
- **Uma década de qualidade do ar em Bogotá (1998–2018)** — QA/QC, tendências, lacunas PM_{2,5}:
Mura et al., 2020, *Frontiers in Environmental Science*. DOI:
[10.3389/fenvs.2020.00065](https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00065)

○ **Composição** **e** **fontes:**

- **Composição química e PMF (PM₁₀ urbano)** — 311 amostras (2015–2016):
Ramírez et al., 2018, *Environmental Pollution*. DOI:
[10.1016/j.envpol.2017.10.045](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.045)
- **Excesso incremental de componentes/PM_{2,5}** — Soacha vs Mosquera; CMB + marcadores:
Atmósfera (2022). (Buscar por título informado)
- **Impacto regional de queimadas (Norte da América do Sul) sobre Bogotá** — WRF-Chem:
Méndez-Espinosa et al., 2019, *Atmospheric Environment*. DOI:
[10.1016/j.atmosenv.2019.01.042](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.042)

○ **Saúde** **&** **modificadores** **socioeconômicos:**

- **Exposição pessoal no transporte** — TransMilenio vs SITVA (PM_{2,5}):
Castillo-Camacho et al., 2020, *Asian Journal of Atmospheric Environment*. DOI: [10.5572/ajae.2020.14.3.210](https://doi.org/10.5572/ajae.2020.14.3.210)
- **Excesso evitável de mortalidade por PM_{2,5} (Colômbia 2014–2019):**
Rodriguez-Villamizar et al., 2022, *Environmental Health*.
- **Justiça ambiental e tom de pele (Colômbia)** — mudanças 2010→2016:
Aguilar-Gómez et al., 2025, *PNAS*. DOI: [10.1073/pnas.2407064122](https://doi.org/10.1073/pnas.2407064122)

○ **Relatórios** **e** **marcos** **institucionais:**

- **RM CAB — Relatório Anual 2022 (SDA Bogotá) (PDF):**
<http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Informe%20anual%202022.p>

[df](#)

- **Observatório Ambiental de Bogotá (OAB) — Qualidade do Ar:**
<https://oab.ambientebogota.gov.co/>
Indicador PM2,5: <https://oab.ambientebogota.gov.co/concentracion-de-material-particulado-inferior-a-2-5-micrometros-pm2-5-promedio-anual/>
- **IDEAM — Estado da Qualidade do Ar na Colômbia (2023):**
<https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/Estado-de-la-calidad-del-aire>
StoryMap:
<https://storymaps.arcgis.com/stories/8d565731dfb1413eb679f9bd904de1c5>
- **Plan Aire Bogotá 2030 — relatórios de seguimento (OAB):**
(Acessar via OAB) <https://oab.ambientebogota.gov.co/>

- **Portais e bases de dados:**

- a. **Qualidade do ar e APIs**

- **RM CAB (tempo real / relatórios de estação / IBOCA):**
Mapa: <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/home/map>
Relatórios: <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Report/stationreport>
IBOCA: <http://iboca.ambientebogota.gov.co/mapa/>
 - **OpenAQ (Bogotá / API v3):**
Site: <https://openaq.org/> | Docs: <https://docs.openaq.org/> | Explorar: <https://explore.openaq.org/>
Locais CO/SDA: <https://openaq.org/#/locations?page=1&countries=CO&sources=sectoria-distrital-de-ambiente>
 - **SISAIRE (IDEAM):**
Portal: <http://sisaire.ideam.gov.co> | Departamentos: http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/calidad_aire_departamento.xhtml | Consultas: <http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/consultas.xhtml>
 - **Dados Abertos Bogotá (PM2,5 anual, localização de estações etc.):**
Portal: <https://datosabiertos.bogota.gov.co/> | IDECA: <https://portal.ideca.gov.co/>
Dataset PM2,5: <https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/concentracion-de-material-particulado-inferior-a-2-5-micrometros-pm2-5-promedio-rmcab>

- b. **Meteorologia:**

- **IDEAM — DHIME:** <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
| Catálogo estações: <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu>
- **IDIGER — SAB** (rede urbana hidro-meteo):
<https://www.sire.gov.co/web/sab/inicio>
- **Reanálises:** ERA5 (Copernicus)
<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels> | MERRA-2 (NASA)
<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/merra-2/>

c. Socioeconômicos

e

geoespaciais:

- **DANE (Censo 2018 / Microdados):**
<https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/643>
Projeções Bogotá: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion/proyecciones-de-poblacion-bogota>
EM Bogotá-Cundinamarca:
<https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/743>
- **Secretaria Distrital de Planeación (SDP) —** Visor de população / estratificação:
Visor: <https://www.sdp.gov.co/noticias/disponible-visor-de-poblacion-datos-bogota-localidad-y-upz>
Estratificação: <https://www.sdp.gov.co/gestion-estudios-estrategicos/estratificacion/estratificacion-por-localidad>
- **IDECA / Mapas Bogotá** (shapes de localidades, UPZ, manzana-estrato):
Portal: <https://www.ideca.gov.co/> | Mapas:
<https://mapas.bogota.gov.co>
Localidades: <https://bogota-laburbano.opendatasoft.com/explore/dataset/poligonos-localidades/>
UPZ: <https://bogota-laburbano.opendatasoft.com/explore/dataset/upz-bogota/>
Estratificação (manzana):
<https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/estratificacion-para-bogota>
Mapa de referência:
<https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/mapa-de-referencia>

➤ **Pequenas entrevistas/questionários:**

Para entender o que os moradores pensam, criamos um questionário online anônimo. A ideia era simples: perguntar como a poluição do ar afeta o dia a dia das pessoas e se elas sentem que o problema é pior em algumas áreas da cidade do que em outras.

1. Em qual "localidade" de Bogotá você mora?
2. Pensando na sua rotina diária, com que frequência a má qualidade do ar afeta negativamente suas atividades (como praticar esportes, abrir as janelas, etc.)?
3. Na sua percepção, a resposta das autoridades (alertas, restrições, etc.) aos picos de poluição é suficiente e eficaz para proteger a saúde dos moradores da sua região?
4. Você considera que a poluição do ar é um problema que afeta todos os bairros de Bogotá da mesma forma, ou alguns bairros sofrem um impacto muito maior?
5. Qual destes fatores você acredita que mais contribui para a má qualidade do ar especificamente no seu bairro?
6. Você acredita que a qualidade do ar tem um impacto direto na saúde da sua família?
7. Se você tivesse que descrever a qualidade do ar no seu bairro com uma palavra, qual seria?

Até o momento, recebemos 13 respostas para nosso questionário. O público-alvo são moradores de Bogotá interessados em compartilhar sua percepção sobre a qualidade do ar na cidade.

O Link do formulário é <https://forms.gle/qPV7y5SKdgHrNztH7>

➤ **Registro de vocabulário temático. (glossário)**

1. **PM2.5 (Material Particulado 2.5):** Partículas finas em suspensão no ar com diâmetro de até 2.5 micrômetros. Devido ao seu tamanho reduzido, podem penetrar profundamente no sistema respiratório, sendo um dos poluentes mais nocivos à saúde pública.
2. **RM CAB (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá):** Infraestrutura oficial de estações que medem continuamente a concentração de poluentes atmosféricos em diferentes pontos de Bogotá, gerando os dados primários para análises de qualidade do ar.
3. **WRF-Chem (Weather Research and Forecasting with Chemistry):** É um modelo numérico avançado que simula as condições meteorológicas e os processos químicos da atmosfera. É usado para prever a dispersão e a transformação de poluentes.
4. **IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales):** Entidade governamental da Colômbia responsável pelo monitoramento das condições climáticas, hidrológicas e ambientais do país, incluindo a qualidade do ar ao nível nacional.
5. **DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística):** Principal fonte de dados demográficos e socioeconômicos da Colômbia, como censos e pesquisas de estratificação, essenciais para a análise da vulnerabilidade social.

6. **UPZ (Unidad de Planeamiento Zonal):** Divisão territorial de Bogotá, menor que as localidades, usada para o planejamento urbano e a análise de dados em uma escala mais detalhada.
7. **Ação preventiva:** Agir antes da crise para evitar picos de poluição.
8. **Alerta de má qualidade do ar:** Aviso oficial com orientações à população.
9. **Análise de Dados:** Processo de examinar, limpar, transformar e modelar dados para descobrir informações úteis, tirar conclusões e apoiar a tomada de decisões.
10. **API (Application Programming Interface):** Interface que permite a comunicação e a troca de dados de forma automatizada entre diferentes sistemas de software, como os portais de qualidade do ar.
11. **Arborização viária:** árvores nas ruas que reduzem poeira e melhoram o microclima.
12. **Bases de Dados:** Conjuntos organizados de informações, como os fornecidos pela RMCAB ou pelo DANE, que servem como matéria-prima para a pesquisa.
13. **Covariáveis:** Variáveis secundárias que podem influenciar a relação entre as variáveis de interesse principal. No projeto, são exemplos as variáveis climáticas ou sociais.
14. **Dados abertos:** informações públicas reutilizáveis por qualquer pessoa.
15. **Desigualdade Ambiental:** Distribuição desigual dos riscos e danos ambientais entre diferentes grupos sociais, onde comunidades vulneráveis arcam com uma carga desproporcional da poluição.
16. **Dispersão Atmosférica:** Processo pelo qual os poluentes se espalham e se diluem na atmosfera, influenciado por fatores como vento, temperatura e topografia.
17. **Equidade:** Princípio de justiça que busca tratar desigualmente os desiguais, oferecendo mais proteção e recursos às comunidades mais vulneráveis.
18. **Escala Likert:** Escala psicométrica usada em questionários para medir atitudes ou opiniões, variando geralmente de "Discordo totalmente" a "Concordo totalmente".
19. **Estratificação Socioeconômica:** Classificação de áreas residenciais em estratos (1 a 6 em Bogotá) com base nas características físicas das moradias e seu entorno, servindo como um indicador de nível socioeconômico.
20. **Exposição (à poluição):** Contato de uma pessoa ou população com uma determinada concentração de poluentes durante um certo período.
21. **Fontes de Emissão:** Origens dos poluentes atmosféricos, que podem ser fixas (indústrias) ou móveis (veículos).
22. **Incerteza:** Margem de erro das medições e previsões.

23. **Indicadores Sociais:** Medidas estatísticas (renda, densidade populacional, acesso à saúde) usadas para descrever e analisar as condições de vida e a vulnerabilidade de uma população.
24. **Inventário de Emissões:** Cadastro quantitativo das fontes de poluição e da quantidade de poluentes que elas emitem em uma determinada área e período.
25. **Justiça Ambiental:** Movimento e campo de estudo que defende o direito de todos a um meio ambiente seguro e saudável, combatendo a desigualdade ambiental e promovendo a participação justa na tomada de decisões.
26. **Krigagem:** Método geoestatístico de interpolação usado para estimar o valor de uma variável em locais não amostrados a partir de dados de pontos conhecidos.
27. **Medidas Reativas:** Ações e políticas públicas implementadas somente após a ocorrência de um evento crítico, como um pico de poluição, em oposição a medidas preventivas.
28. **Microdados:** Dados brutos e detalhados coletados em pesquisas (como o censo do DANE), que permitem análises estatísticas aprofundadas.
29. **Modelo Preditivo:** Ferramenta estatística ou matemática que utiliza dados históricos e atuais para prever resultados futuros, como os níveis de poluição.
30. **Monitoramento:** Acompanhamento contínuo e sistemático de um fenômeno, como a qualidade do ar, por meio de medições regulares.
31. **Mortalidade:** Número de mortes em uma determinada população. No contexto do projeto, refere-se ao excesso de mortes associado à exposição à poluição.
32. **Padrões Espaciais:** Distribuição e arranjo de um fenômeno no espaço geográfico, como as áreas de maior e menor concentração de poluentes.
33. **Padrões Temporais:** Variações e tendências de um fenômeno ao longo do tempo (horas, dias, anos).
34. **Planejamento Urbano:** Processo técnico e político relacionado ao desenvolvimento e uso do solo nas cidades, influenciando diretamente a distribuição da poluição e a exposição das comunidades.
35. **Poluição Atmosférica:** Presença de substâncias no ar em concentrações que podem ser nocivas à saúde humana e ao meio ambiente.
36. **Queimadas:** Incêndios em áreas de vegetação que liberam grandes quantidades de fumaça e material particulado na atmosfera, podendo afetar a qualidade do ar em regiões distantes.
37. **Relatórios Distritais:** Documentos oficiais publicados por entidades governamentais da cidade (distrito), como os relatórios anuais da RMCAB.

38. **Sazonalidade:** Padrões que se repetem por estação/época do ano.
39. **Saúde Pública:** Campo da ciência dedicado a proteger e melhorar a saúde das populações por meio da prevenção de doenças, promoção da saúde e políticas públicas.
40. **Séries Temporais:** Sequência de pontos de dados medidos em intervalos de tempo sucessivos. A análise de séries temporais é usada para identificar tendências e prever valores futuros.
41. **Topografia:** Características físicas da superfície de uma área, como montanhas e vales, que exercem grande influência na dispersão de poluentes.
42. **Variáveis Climáticas:** Fatores meteorológicos como vento, chuva e temperatura, que afetam diretamente a concentração e o transporte de poluentes no ar.
43. **Visor (de população):** Ferramenta digital e interativa que permite visualizar dados georreferenciados em um mapa, como a distribuição da população em Bogotá.
44. **Vulnerabilidade Social:** Condição de suscetibilidade de um grupo social a sofrer danos devido à sua exposição a riscos e à sua limitada capacidade de resposta ou adaptação.
45. **Zona Sudoeste (de Bogotá):** Área da cidade (incluindo localidades como Kennedy, Bosa, Ciudad Bolívar) que, segundo estudos, apresenta as maiores concentrações de poluentes e abriga uma grande população em estratos socioeconômicos mais baixos.
46. **Carga consolidada:** Agrupamento de vários envios pequenos de diferentes clientes em um único carregamento maior, seja em caminhão ou contêiner, otimizando o transporte e reduzindo custos operacionais e emissões.
47. **Corredores prioritários:** Rotas ou zonas estratégicas de alta importância para transporte, desenvolvimento econômico ou conservação ambiental, conectando pontos-chave como centros urbanos, portos e fronteiras.
48. **Mapa de calor:** Representação visual de dados que usa cores para mostrar a intensidade de um fenômeno em área bidimensional, onde cores quentes (vermelho, laranja) indicam valores altos e cores frias (azul, verde) indicam valores baixos.
49. **Micrologística limpa:** Otimização de processos logísticos internos com práticas sustentáveis, incluindo uso de transporte ecológico (bicicletas, veículos elétricos), rotas otimizadas e redução de embalagens para minimizar impacto ambiental.
50. **Nuvem de palavras (Word Cloud):** Visualização de dados textuais onde o tamanho das palavras indica sua frequência de aparição, permitindo identificar rapidamente os temas principais de um texto ou conjunto de documentos.
51. **Retrofit:** Modernização de sistemas, equipamentos ou veículos existentes com tecnologia nova para melhorar desempenho e eficiência, adaptando-os a normas atuais sem os substituir completamente.
52. **Scrolltelling:** Técnica narrativa digital que combina rolagem da página web com elementos multimídia (animações, vídeos, áudio), transformando o conteúdo conforme o usuário navega para criar experiência imersiva e explicar temas complexos de forma compreensível.