

## ARTIGO ORIGINAL



## Desempenho dos dados de material particulado fino sobre a qualidade do ar em estudo epidemiológico em Salvador, Brasil

### Performance of fine particulate matter data on air quality in an epidemiological study in Salvador, Brazil

Ludmilla Viana Jacobson<sup>I</sup> , Sandra Hacon<sup>II</sup> , Vanúcia Schumacher<sup>III</sup> ,  
Clarcsn Plácido Conceição Dos Santos<sup>IV</sup> , Nelzair Vianna<sup>V</sup>

<sup>I</sup>Universidade Federal Fluminense, Departamento de Estatística – Niterói (RJ), Brasil.

<sup>II</sup>Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>III</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, São José dos Campos (SP), Brasil.

<sup>IV</sup>Escola Bahiana de Medicina e Saúde Pública, Programa de Pós-Graduação em Medicina e Saúde Humana – Salvador (BA), Brasil.

<sup>V</sup>Fundação Oswaldo Cruz, Laboratório de Biologia Molecular e Bioestatística – Salvador (BA), Brasil.

## RESUMO

**Objetivo:** Avaliar o desempenho das concentrações de material particulado com diâmetro inferior a 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) derivadas de satélite em comparação com medições de estações de monitoramento no município de Salvador, bem como as implicações dessas estimativas para as associações de PM<sub>2,5</sub> com a mortalidade diária não acidental. **Métodos:** Trata-se de estudo de séries temporais diária que cobre o período de 2011 a 2016. Foi proposto um fator de correção para melhorar a acurácia entre as duas fontes de dados. Os efeitos do PM<sub>2,5</sub> foram estimados em modelos aditivos generalizados de Poisson, combinados com uma abordagem de defasagem distribuída. **Resultados:** Os resultados sugerem que os dados derivados de satélite subestimaram os níveis de PM<sub>2,5</sub> em comparação com as medições médias terrestres. No entanto, a aplicação de um fator de correção melhorou a acurácia entre os dados. Os riscos relativos estimados com base nos dados derivados de satélite não apresentaram diferenças significativas quando comparados com aqueles baseados nas médias dos monitores. **Conclusão:** O estudo destaca a importância de validar dados de PM<sub>2,5</sub> modelados por satélite para avaliar e compreender os impactos na saúde. O desenvolvimento de modelos que utilizam sensoriamento remoto para estimar PM<sub>2,5</sub> permite a quantificação dos riscos à saúde decorrentes da exposição.

**Palavras-chave:** Poluição do ar. Saúde pública. Séries temporais. Sistemas de informações.

**AUTORA CORRESPONDENTE:** Ludmilla da Silva Viana Jacobson. Rua Professor Marcos Waldemar de Freitas Reis, s/n, Bloco H, 5º andar, ala A, São Domingos – CEP: 24.210-201, Niterói (RJ). E-mail: ludmillaviana@yahoo.com.br

**CONFLITO DE INTERESSES:** nada a declarar

**COMO CITAR ESSE ARTIGO:** Jacobson LSV, Hacon SS, Schumacher V, Santos CPC, Vianna NA. Desempenho dos dados de material particulado fino sobre a qualidade do ar em estudo epidemiológico em Salvador, Brasil. Rev Bras Epidemiol. 2024; 27: e240068. <https://doi.org/10.1590/1980-549720240068.2>

**EDITORA ASSOCIADA:** Maria Tereza Pepe Razzolini

**EDITORA CIENTÍFICA:** Cassia Maria Buchalla

Esse é um artigo aberto distribuído sob licença CC-BY 4.0, que permite cópia e redistribuição do material em qualquer formato e para qualquer fim desde que mantidos os créditos de autoria e de publicação original.

Recebido em: 24/06/2024

Revisado em: 30/08/2024

Aceito em: 04/10/2024



## INTRODUÇÃO

A poluição do ar é uma ameaça ambiental com múltiplos impactos para a saúde humana. A Organização Mundial da Saúde (OMS) chama a atenção para a carga de doença associada à poluição atmosférica. Milhões de mortes prematuras por acidente vascular cerebral, doenças cardíacas, câncer de pulmão e doenças respiratórias crônicas e agudas, incluindo asma, poderiam ser evitadas ao se reduzirem os níveis de poluição do ar<sup>1</sup>. Populações vulneráveis, incluindo as crianças, idosos, gestantes e pessoas com doenças crônicas, estão em maior risco<sup>2-4</sup>. No Brasil, a Organização Pan-Americana da Saúde reportou 51 mil mortes anuais associadas à poluição atmosférica<sup>5,6</sup>.

A exposição ao material particulado com diâmetro inferior a 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) foi investigada em muitos estudos e tem se mostrado um indicador robusto de risco à saúde, associado a diferentes fontes de emissão<sup>7,8</sup>. Vale ressaltar que o PM<sub>2,5</sub> compreende o material inalável PM<sub>10</sub>. Em áreas urbanas de países desenvolvidos, a fração de PM<sub>2,5</sub> para PM<sub>10</sub> variou de 0,5 a 0,8<sup>9</sup>. No estudo realizado por Cohen et al.<sup>10</sup> em diversas áreas urbanas do mundo, foi adotada a fração de 0,5xPM<sub>10</sub> para estimar o PM<sub>2,5</sub> e calcular o número de mortes prematuras associadas à exposição ao poluente. No Brasil, em estudo realizado em área urbana, a média da razão PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> foi de 0,52<sup>11</sup>. Tanto o PM<sub>2,5</sub> quanto o PM<sub>10</sub> podem ser inalados, porém o PM<sub>2,5</sub> tem maior potencial de risco à saúde, pois as partículas finas podem penetrar profundamente no trato respiratório e atingir os pulmões<sup>12</sup>.

Os estudos epidemiológicos de séries temporais têm sido utilizados para quantificar os riscos associados à exposição a poluentes atmosféricos e desfechos de saúde<sup>13-18</sup>. Um dos relevantes desafios na investigação dos efeitos da poluição do ar sobre a saúde da população nas principais capitais do Brasil é a falta de monitoramento contínuo de poluentes atmosféricos. No Brasil, a rede de monitoramento da qualidade do ar é restrita, o que representa uma limitação para o desenvolvimento de estudos epidemiológicos. Dos 26 estados brasileiros, 11 possuem sistema de monitoramento da qualidade do ar, dos quais 80% estão localizados na Região Sudeste, mas apresentam informações incompletas e acesso limitado referente à qualidade do ar<sup>19</sup>. Para estudos epidemiológicos de séries temporais, o período do estudo e a disponibilidade de dados de qualidade do ar é um fator importante para a redução das incertezas, embora indicadores *proxy* e informações de modelos preditivos também possam ser usados desde que sejam discutidas as suas limitações<sup>20-22</sup>.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), em colaboração com outras instituições brasileiras, desenvolveu o Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental (SISAM) com o objetivo de auxiliar programas de saúde sobre os impactos das emissões de poluentes atmosféricos na saúde humana. O SISAM é uma plataforma *on-line* que disponibiliza as concentrações dos poluentes atmosféricos, estimadas por sensoriamento

remoto com resolução espacial de aproximadamente 12,5 km, que permite uma caracterização espaçotemporal da variabilidade da exposição diária para todos os municípios do Brasil, sem custo para o usuário<sup>23</sup>.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho das estimativas de PM<sub>2,5</sub> provenientes da plataforma SISAM em comparação com medições de estações de monitoramento no município de Salvador no estado da Bahia, bem como suas implicações para as associações de PM<sub>2,5</sub> com a mortalidade não acidental.

## MÉTODOS

### Desenho e área de estudo

Estudo ecológico de séries temporais diárias, no período de 2011 a 2016.

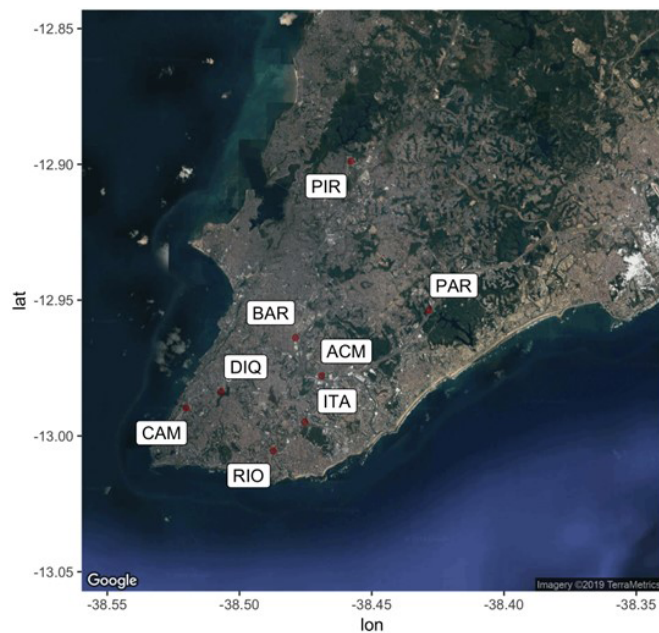
A pesquisa foi realizada em Salvador, segunda maior cidade do nordeste do Brasil e a quinta mais populosa do país, com população de aproximadamente 2,42 milhões de acordo com o Censo de 2022<sup>24</sup>. O município é dividido em dez prefeituras-bairros e estas subdivididas em 163 bairros.

No período de 2011 a 2016, o monitoramento da qualidade do ar em Salvador foi gerenciado pela Cetrel, empresa privada brasileira especializada em monitoramento ambiental. Nesse período, a rede de monitoramento da qualidade do ar de Salvador era composta de oito estações de monitoramento fixas, estrategicamente localizadas em toda a cidade. Essas estações forneciam dados com resolução temporal de uma hora sobre níveis de poluentes como PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> e NO<sub>2</sub>; além de parâmetros meteorológicos, como velocidade e direção do vento, temperatura, umidade e precipitação. Dentre as estações de monitoramento, cinco estavam em operação a partir de 2011, a saber: Campo Grande, Dique do Tororó, CAB/Dique do Paralela, Pirajá, Rio Vermelho. As três estações restantes — como as estações Av. ACM/Detran, Av. Barros Reis e Itaipara — passaram a funcionar em 2013. Até o início deste estudo, as medições diárias de poluentes atmosféricos disponíveis em Salvador eram somente do período de 2011 a 2016. A área de estudo e a localização específica das estações de monitoramento estão apresentadas na Figura 1.

### Bases de dados

#### *Dados medidos de poluentes atmosféricos e parâmetros meteorológicos*

Os dados de PM<sub>10</sub>, temperatura e umidade foram obtidos das estações de monitoramento da Cetrel para o período de 2011 a 2016. Diante da ausência de medições diretas de PM<sub>2,5</sub>, foi utilizada a proporção de 0,5 para PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub>, comumente aceita para áreas urbanas e conforme recomendado por Ostro<sup>25</sup>. Essa abordagem permitiu estimar as concentrações de PM<sub>2,5</sub> com base nos níveis de PM<sub>10</sub> registrados.



PIR: Pirajá; PAR: estação CAB/Paralela; CAM: Campo Grande; RIO: Rio Vermelho; DIQ: Dique do Tororo; ITA: Itaigara; BAR: Barros Reis; ACM: Av. ACM/Detran.

**Figura 1. Localização das estações de monitoramento fixas de Salvador (BA), 2011 a 2016.**

### *Plataforma do Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental (SISAM)*

A plataforma SISAM apresenta planilhas com dados meteorológicos e qualidade do ar para todos os estados e municípios, por data e hora<sup>26</sup>. O SISAM tem como fonte o Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), conjunto de dados de reanálise global da composição atmosférica produzido pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts com o Integrated Forecasting System atualizado. O CAMS combina informações de observações *in situ* e de satélite com modelos computacionais da atmosfera para gerar uma estimativa, a mais precisa possível, de gases e aerossóis atmosféricos. A validação do CAMS é realizada periodicamente e coordenada pela Royal Dutch Meteorological Organization<sup>27,28</sup>. Innes et al.<sup>29</sup> avaliaram o desempenho das reanálises do CAMS comparando versões anteriores, e Wang et al.<sup>30</sup> validaram o CAMS usando medições de aeronaves em diferentes partes do mundo, incluindo o Brasil.

Para as análises deste estudo e caracterização espaçotemporal da variabilidade da exposição diária em Salvador, foi considerada a média diária de PM<sub>2,5</sub> no período de 2011 a 2016.

### *Dados de óbitos*

O desfecho de saúde investigado foi o número total de óbitos diários por todas as causas não acidentais. Os dados de óbito foram aqueles disponibilizados no Sistema de Informação sobre Mortalidade por meio do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde. Foram excluídas das análises as causas acidentais, aquelas registradas na declaração de óbitos como causa básica classificada se-

gundo os códigos S00 a T98, V01 a Y98, Z00 a Z99, U00 a U99 (CID10).

## **Análise dos dados**

### *Medidas de concordância*

A concordância entre os dados diários de PM<sub>2,5</sub> modelados do SISAM e os dados medidos das estações de monitoramento da Cetrel foi investigada por meio do teste *t* para amostras pareadas, do método de Bland-Altman<sup>31</sup> e do coeficiente de correlação de concordância<sup>32,33</sup>. O teste *t* pareado foi utilizado para avaliar diferenças entre os métodos de medição quanto ao viés sistemático. O método Bland-Altman consiste no gráfico de dispersão entre as diferenças (Diferença=PM<sub>2,5</sub> SISAM – PM<sub>2,5</sub> Medidos) e as médias [Média=(PM<sub>2,5</sub> SISAM–PM<sub>2,5</sub> Medido)/2]. Nesse método, as médias são usadas como estimativas do valor verdadeiro do PM<sub>2,5</sub> e, portanto, é possível investigar a relação dos erros com o valor verdadeiro de PM<sub>2,5</sub>. O método também apresenta os limites de concordância calculado por meio da média das diferenças (viés) e seu desvio padrão (sd), como viés±1,96sd. A heterocedasticidade do erro foi avaliada pelo coeficiente de correlação de Pearson entre as diferenças (Y) e as médias (X). O coeficiente de correlação de concordância (CCC) foi utilizado para avaliar o quanto os métodos diferem entre si.

As análises foram realizadas no programa R 3.4.2.2<sup>34</sup>, bibliotecas *epiR*<sup>35</sup> e *blandr*<sup>36</sup>. Foi adotado nível de significância de 5% na interpretação dos resultados dos testes de hipóteses.

### *Calibração dos dados do Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental (SISAM)*

As séries temporais diárias de PM<sub>2,5</sub> observado (dados da Cetrel) e modelado (dados SISAM) foram comparadas por meio de gráficos e estatísticas descritivas. Em seguida, o indicador diferença absoluta ( $\Delta_t = PM_{2,5} \text{ observado}_t - PM_{2,5} \text{ modelado}_t$ ) foi calculado.

Na calibração dos dados, foi proposta a definição de um termo aditivo baseado na média do indicador diferença absoluta ( $\Delta_t$ ), no período de 2011 a 2016. O PM<sub>2,5</sub> calibrado foi calculado pela equação:

$$PM_{2,5} \text{ calibrado}_t = PM_{2,5t} + \bar{x}$$

Em que:

$\bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^n \Delta_t}{n}$ , PM<sub>2,5t</sub> é o PM<sub>2,5</sub> modelado do SISAM no dia *t*; e “*n*” é o total de dias no período de 2011 a 2016.

Este método foi utilizado para corrigir o viés observado nos dados do SISAM.

### *Análise estatística*

Para avaliar a *performance* dos dados do SISAM em estudos epidemiológicos em Salvador, foi proposto um estudo ecológico de séries temporais diárias no período de 2011

a 2016. Foram comparados os efeitos na saúde baseados nos dados medidos pelos monitores fixos com os efeitos estimados por meio dos dados do SISAM calibrados.

Na análise de séries temporais foram ajustados modelos aditivos generalizados (MAG), considerando-se a distribuição de Poisson com função de ligação logarítmica, combinada com o modelo de defasagem distribuída<sup>16,37,38</sup>. A variável resposta foi a contagem diária do número de óbitos, e as variáveis explicativas foram a indicadora do dia calendário para o ajuste da tendência e sazonalidade, temperatura, umidade, indicadora do dia da semana, indicadora de feriados nacionais e PM<sub>2,5</sub>.

A tendência temporal e sazonalidade foram ajustadas no modelo por uma *thin plate spline*, incluída na regressão com 4 graus de liberdade (gl) por ano; a temperatura média diária com defasagem de três dias (Lag 3) foi ajustada por uma *thin plate spline* com 2 gl; a umidade média diária de Lag 3 foi ajustada por uma *thin plate spline* com 2 gl. Diversos ajustes foram avaliados para a tendência temporal e sazonalidade, variando o tipo da *spline* e graus de liberdade (gl: 4 a 6 por ano). Da mesma forma para a temperatura e umidade, em que além das médias diárias foram avaliadas as defasagens de Lag 1, Lag 2 e Lag 3. A escolha do número de gl e do melhor ajuste para o modelo foi baseada no critério de informação de Akaike (AIC), em gráficos de dispersão dos resíduos de *deviance* e periodograma. Após a escolha do melhor ajuste para a tendência e sazonalidade do tempo, temperatura e umidade, foram incluídas as variáveis indicadoras de dia da semana e feriado nacional.

Como os efeitos da poluição do ar sobre a mortalidade podem ocorrer no mesmo dia da exposição ou em dias posteriores, o PM<sub>2,5</sub> foi ajustado por uma função polinomial de defasagem distribuída. O ajuste considerou um polinômio de segundo grau e defasagem de até 30 dias (lag 0-30). Além disso, foram estimados também os efeitos *Single Lag* de zero a cinco dias. Os resultados foram apresentados como risco relativo (RR) e incremento percentual do risco de óbito para cada aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2,5</sub>, assim como os respectivos intervalos de confiança de 95% (IC95%). Ademais, foi apresentada a curva exposição-lag-resposta dos efeitos do PM<sub>2,5</sub> sobre a mortalidade acumulados em 30 dias de exposição.

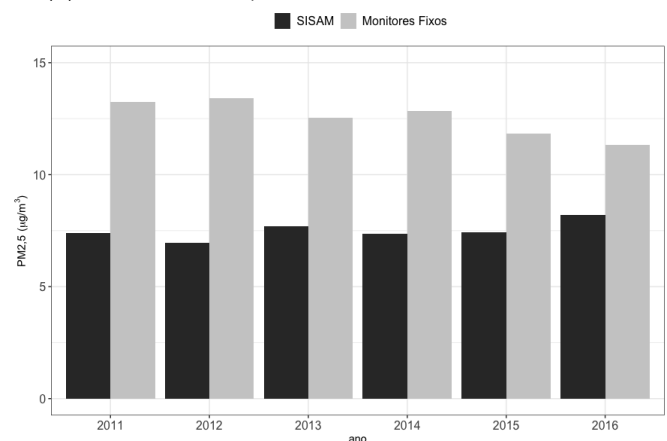
## RESULTADOS

Durante o período do estudo, a concentração média de PM<sub>2,5</sub>, medida pelos monitores fixos da Cetrel e calculada com base nos dados medidos de PM<sub>10</sub>, foi de 12,5 µg/m<sup>3</sup>, enquanto os dados de PM<sub>2,5</sub> modelados do SISAM foram, em média, de 7,5 µg/m<sup>3</sup>±2,9 µg/m<sup>3</sup>. As médias anuais de PM<sub>2,5</sub>, apresentadas na Figura 2A, ultrapassaram a recomendação da OMS para a média anual de qualidade do ar de 5 µg/m<sup>3</sup><sup>39</sup>. Foram registradas, em média, 35±6,1 mortes não acidentais por dia. Além disso, a temperatura média diária ficou em torno de 26°C, com umidade relativa de 73%

(Tabela 1). As variáveis ambientais apresentaram baixas correlações com as mortes não acidentais (Figura 2B).

As Figuras 3 e 4 mostram a comparação das séries temporais diárias entre os dados modelados do SISAM e as concentrações médias dos dados medidos de PM<sub>2,5</sub>. Os dados modelados do SISAM subestimaram os níveis de PM<sub>2,5</sub> de Salvador no período de estudo em comparação com as medições médias das estações de monitoramento da Cetrel, com diferença média diária estatisticamente significativa de 5,021 µg/m<sup>3</sup> (p<0,001) (Figura 4). Esse resultado indica um viés sistemático. Apesar dessa subestimação, ambos os dados exibiram uma tendência e um padrão de sazonalidade semelhantes. O coeficiente de correlação de concordância foi baixo, de 0,20 (IC95% 0,18–0,22), sugerindo uma pequena concordância entre as duas fontes de dados. Durante eventos atípicos de poluição, quando as concentrações de PM<sub>2,5</sub> estiveram acima de 30 µg/m<sup>3</sup>, a discrepância entre as medições do SISAM e das médias dos monitores da Cetrel aumentou. A diferença relativa entre os valores máximos das séries temporais foi de aproximadamente 50%. Para a

(A) Médias anuais - PM<sub>2,5</sub>



(B) Correlação de Spearman entre as variáveis

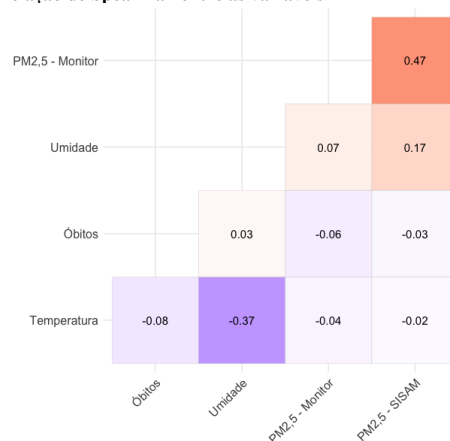
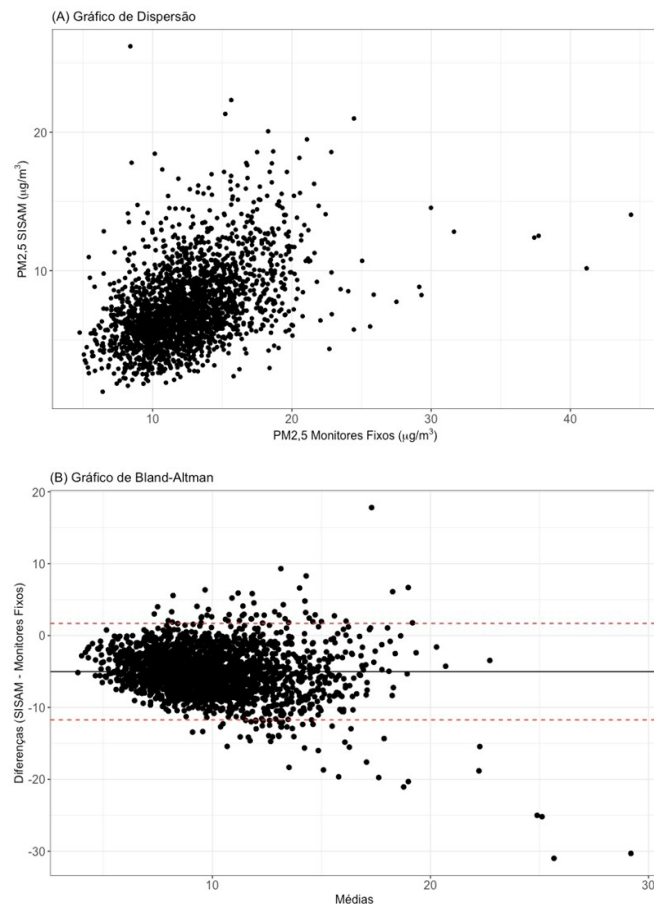


Figura 2. Médias anuais dos dados de material particulado com diâmetro inferior a 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) do Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental (SISAM) e das estações de monitoramento (A) e correlações com as variáveis meteorológicas (B). Salvador (BA), 2011 a 2016.

**Tabela 1. Estatísticas resumo dos dados diários das variáveis de exposição, meteorológicas e de saúde. Salvador, 2011 – 2016.**

	Medidas Diárias							
	Min	P25	P50	Méd	P75	Max	var	sd
PM2,5 (µg/m³) – SISAM	1,3	5,6	7,1	7,5	9,0	26,2	8,4	2,9
PM2,5 (µg/m³) – Monitores fixos	4,8	10,1	12,2	12,5	14,5	44,4	12,7	3,6
Temperatura (°C)	22,0	25,3	26,4	26,3	27,4	29,3	1,9	1,4
Umidade (%)	59,1	69,1	72,2	73,0	76,3	93,5	31,2	5,6
Mortes por causas não acidentais	17,0	31,0	35,0	35,1	39,0	68,0	37,5	6,1

Min: valor mínimo; Max: valor máximo; P25: percentil 25; P50: percentil 50; Méd: média; P75: percentil 75; var: variância; sd: desvio padrão.



Monitores Fixos: refere-se aos dados de PM<sub>2,5</sub> medidos pelas estações de monitoramento; SISAM: refere-se aos dados estimados SISAM.

**Figura 3. Comparação entre os dados modelados de material particulado com diâmetro inferior a 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) (Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental — SISAM) e os dados medidos pelas estações de monitoramento (Monitores Fixos). Salvador (BA), 2011 a 2016.**

correlação cruzada entre as duas séries temporais, o coeficiente de correlação na defasagem 0 foi de 0,45, diminuindo à medida que a defasagem aumentou.

Na Figura 3A, observa-se relação positiva entre as variáveis. De maneira geral, quando as concentrações de PM<sub>2,5</sub> medidas pelas estações de monitoramento aumentam, as estimativas do SISAM também aumentam. A análise por meio do gráfico de Bland-Altman (Figura 3B) demonstrou que, embora a maioria dos pontos dos dados estivesse

dentro dos limites de concordância, uma correlação negativa estatisticamente significativa ( $p=-0,23$ ,  $p<0,001$ ) entre as diferenças (Y) e as médias (X) das medidas de PM<sub>2,5</sub> indica heterocedasticidade dos erros. Esse viés foi mais pronunciado para valores médios acima de 20 µg/m<sup>3</sup>, ressaltando a necessidade de calibração para aumentar a acurácia das estimativas.

O viés acima identificado foi utilizado como fator de correção para as medidas do SISAM. Ao adicionar 5,021 µg/m<sup>3</sup>, a série calibrada apresentou melhor alinhamento com os dados medidos, mantendo a variabilidade dos dados originais do SISAM (Figura 4).

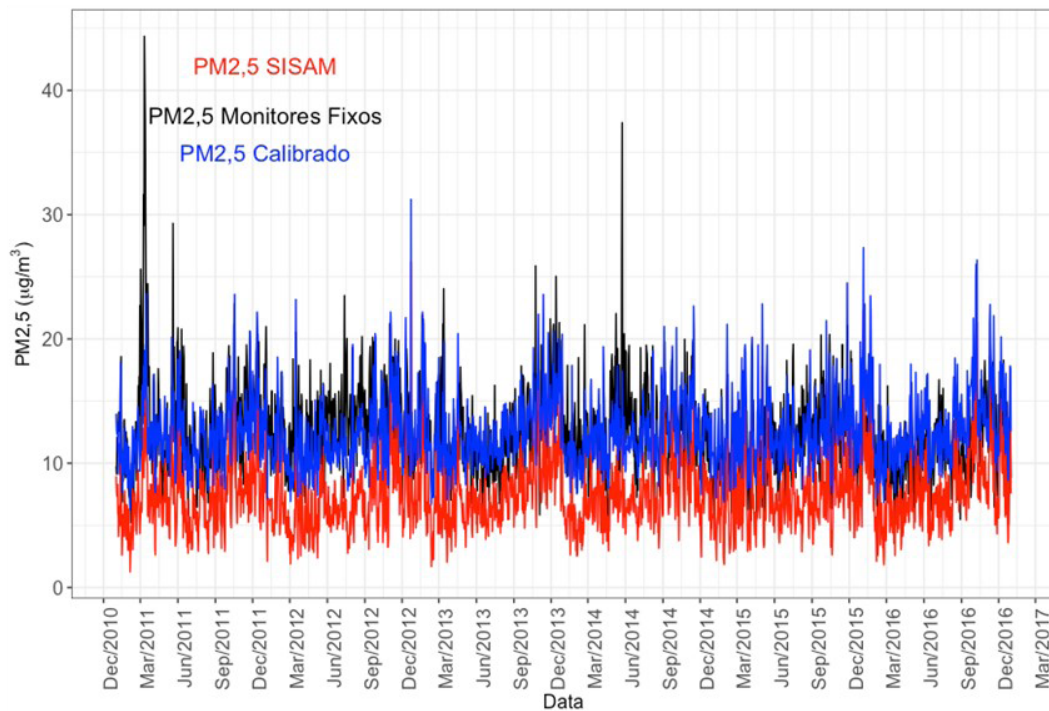
Embora os resultados tenham indicado um viés sistemático para os dados do SISAM e erros associados à magnitude da estimativa de média do PM<sub>2,5</sub>, ao se compararem os efeitos na saúde não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as estimativas de risco baseadas nas médias de PM<sub>2,5</sub> dos monitores fixos da Cetrrel e os dados calibrados de PM<sub>2,5</sub> (Figura 5). Para cada aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> no PM<sub>2,5</sub>, o risco estimado de óbito foi de 0,5% (IC95% -2,1–3,3%) associado à exposição defasada em cinco dias.

As curvas de exposição-lag-resposta para os efeitos acumulados do PM<sub>2,5</sub> ao longo de 30 dias indicaram baixo risco de morte nos primeiros dias após a exposição, com maior incerteza nos resultados derivados dos dados calibrados do SISAM em comparação com os dados dos monitores fixos (Figura 6). O coeficiente de concordância entre as estimativas de RR dos dados medidos e dos dados calibrados do SISAM foi de 0,80 (IC95% 0,70–0,88), indicando boa concordância entre as medidas de risco.

Como a maioria dos RR estimados não foi estatisticamente significativa, não é possível afirmar que a exposição ao PM<sub>2,5</sub> seja fator de risco para a mortalidade em Salvador no período estudado.

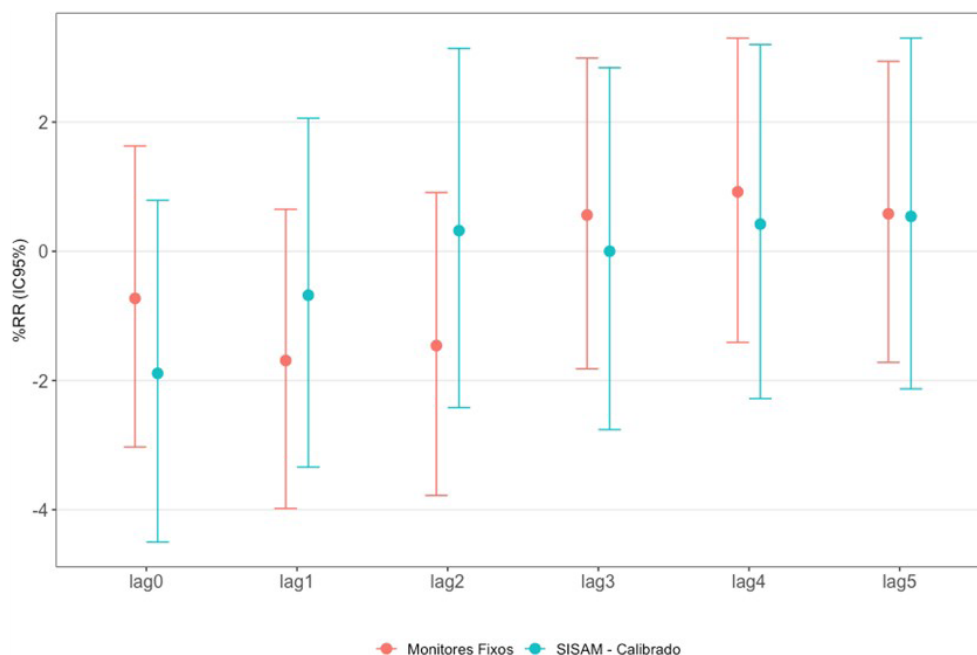
## DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo demonstram a subestimação significativa dos níveis de PM<sub>2,5</sub> modelados por sensoriamento remoto e revelam a necessidade de calibração para garantir a acurácia dos dados nos estudos de avaliação de risco na saúde. Apesar do viés sistemático e dos erros heterocedásticos identificados, o método de calibra-



\*A diferença média entre os dados do SISAM e dos monitores fixos foi de 5,021 e o erro quadrático médio (RSME) foi de 6,1; a correção consistiu em somar este fator (5,021) aos dados do SISAM. Em azul está a série temporal de PM<sub>2,5</sub> calibrado, com RMSE de 3,42.

**Figura 4.** Séries temporais dos dados diários de material particulado com diâmetro inferior a 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) do Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental (SISAM) (Original e Calibrado) medidos pelas estações de monitoramento (PM<sub>2,5</sub> Monitores Fixos). Salvador (BA), 2011 a 2016.



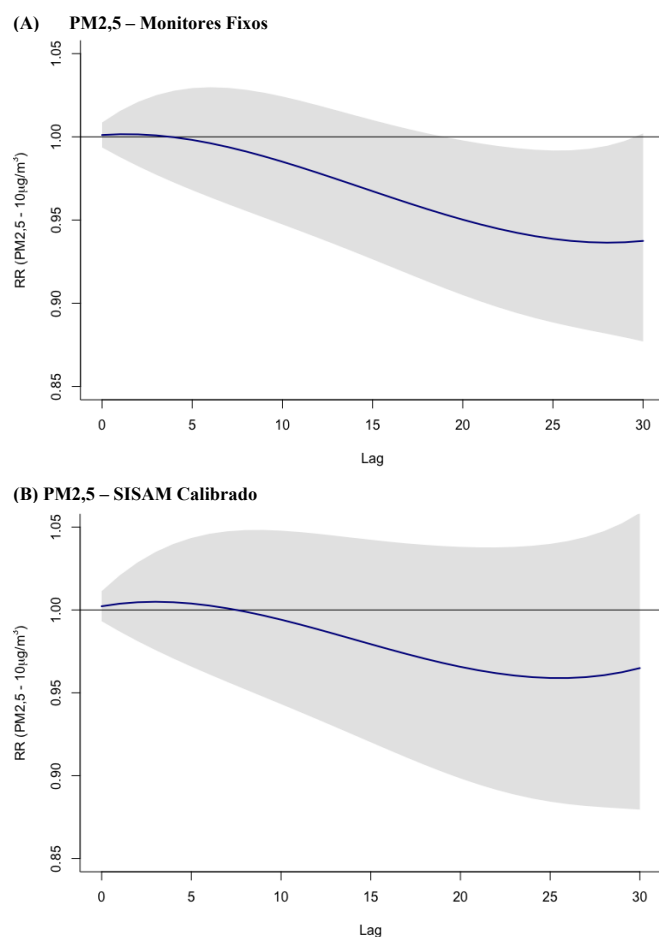
\*%RR: (risco relativo -1)\*100

**Figura 5.** Variação percentual do risco (intervalo de confiança de 95%) de óbitos associado ao aumento 10 µg/m<sup>3</sup> nos níveis de material particulado com diâmetro inferior a 2,5 µm — PM<sub>2,5</sub> (Monitores Fixos e Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental — SISAM). Salvador (BA), 2011 a 2016.

ção simples proposto ajustou efetivamente as estimativas de PM<sub>2,5</sub> do SISAM, demonstrando o potencial dos dados modelados por sensoriamento remoto para fornecer informações valiosas sobre a exposição à poluição do ar e suas implicações para a saúde. Destaca-se a situação crítica da

poluição do ar em Salvador, com os níveis de PM<sub>2,5</sub> excedendo as diretrizes da OMS<sup>39</sup>.

Embora a concordância entre os dados médios dos monitores fixos e do SISAM tenha sido baixa, os efeitos estimados pelos modelos de regressão apresentaram alta



Estruturas de *lag* cumulativas do lag 0 ao lag 30, com restrição de um polinômio de segundo grau. A área de sombra representa IC95%.

**Figura 6. Risco relativo (RR) (intervalo de Confiança de 95%) acumulado de órbitas associado ao aumento 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nos níveis de material particulado com diâmetro inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  — PM<sub>2,5</sub> (Monitores Fixos, Sistema de Informações Ambientais Integrado à Saúde Ambiental — SISAM Calibrado). Salvador (BA), 2011 a 2016.**

concordância, e as diferenças entre as estimativas de risco relativo não foram estatisticamente significativas. Esses resultados sugerem que os dados provenientes do SISAM podem ser uma fonte confiável para avaliar os efeitos da poluição atmosférica na saúde, especialmente porque a calibração da série temporal não alterou a tendência, a sazonalidade e a variabilidade da série.

A aplicação de dados modelados na avaliação da exposição à poluição atmosférica para estudos de saúde é um campo em expansão dentro da epidemiologia<sup>40-42</sup>. No entanto, a utilização de dados modelados sobre a qualidade do ar sem a devida e específica validação para o local de estudo pode levar a subestimações ou sobrestimações dos impactos da poluição atmosférica na saúde. Existem diferentes métodos de calibração para dados modelados, como o proposto neste estudo, que efetivamente corrigiu a distribuição dos dados modelados do SISAM<sup>43,44</sup>.

Embora boa parte dos riscos estimados tenha sido não significativa, a exposição diária a baixas concentrações de poluentes representa em longo prazo uma exposição acumulada que pode impactar a qualidade de vida<sup>45-48</sup>. Estudos epidemiológicos de séries temporais têm sido usados para quantificar os riscos associados à exposição de curto prazo a poluentes atmosféricos na saúde<sup>13-17</sup>. Um estudo em São Paulo observou que os poluentes PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> e CO foram significativamente associados a mortes não acidentais e por causas específicas tanto nos modelos de defasagem de um dia (*Single Lag*) quanto nos modelos de defasagem acumulada<sup>16</sup>. Para a mortalidade não acidental, em Salvador, o risco estimado associado à exposição ao PM<sub>2,5</sub> foi de 0,5% (IC95% -2,1–3,3) e, na cidade de São Paulo, foi de 0,6% (IC95% 0,4–0,8%).

É importante destacar a plataforma SISAM porque ela opera segundo princípios de dados abertos. Esses dados contribuem para o monitoramento da qualidade do ar, a comunicação de riscos e a investigação sobre os impactos da poluição atmosférica nos resultados de saúde. A comunicação de risco no Brasil tem como base a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n° 491, que tem como referência os valores guia de qualidade do ar recomendados pela OMS em 2005, que indica como padrão para a exposição diária ao PM<sub>2,5</sub> o valor de 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Essa concentração foi revisada e atualizada pela OMS em 2021 para o valor de exposição diária de 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para o período estudado em Salvador, o valor médio de PM<sub>2,5</sub> corrigido foi de 12,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e o valor máximo de 31,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . O valor máximo ultrapassou duas vezes o limite da OMS, o que aponta um estado de alerta para determinados bairros de Salvador, considerando-se os grupos vulneráveis como gestantes, crianças menores de cinco anos e pessoas com comorbidades.

Vale destacar que o estudo de caso do município de Salvador é uma aplicação local, caracterizada por condições meteorológicas estáveis e baixa variabilidade das concentrações de PM<sub>2,5</sub>, fatores que contribuem para resultados melhores de dados modelados por satélites para avaliações da qualidade do ar na região.

Embora essa ferramenta de dados modelados por satélites seja usada nos Estados Unidos desde 2009 em estudos de saúde ambiental<sup>23</sup>, algumas lacunas devem ser discutidas, como por exemplo:

1. As concentrações de material particulado ao nível do solo são medidas pontuais em locais fixos, que podem ser mais representativas da zona de respiração em comparação com o valor bruto de profundidade óptica do aerossol (AOD), que representa a integração de toda a coluna atmosférica;
2. As concentrações de material particulado no solo são monitoradas continuamente (por exemplo, hora em hora, a cada três horas por um período de 24 horas), enquanto o AOD é medido quando o satélite passa, que é normalmente uma vez por dia para os instrumentos

usados com mais frequência; por isso a medida derivada do satélite não necessariamente representa a variabilidade em cada local;

3. Para os estudos de saúde é importante conhecer a composição do material particulado, porque isso auxilia na compreensão da toxicidade para a saúde humana, e o dado modelado não permite esse conhecimento;
4. Os dados de satélite são sub-representados em dias com elevada nebulosidade, pois esta mascara as habilidades de recuperação dos dados.

Nesse sentido, Salvador é cidade privilegiada, porque apresenta baixa variabilidade dos parâmetros meteorológicos que podem interferir nas medidas de AOD e sua modelagem. Os dados da plataforma SISAM para o município de Salvador são válidos para estimar os riscos à saúde da exposição ao PM<sub>2,5</sub> por meio de modelos de séries temporais, embora subestimem a concentração média diária do poluente. Assim, este estudo destaca a subestimação dos níveis de PM<sub>2,5</sub> pelo SISAM e recomenda a aplicação de um fator de correção de 5 µg/m<sup>3</sup> para melhorar a acurácia. Embora existam as incertezas inerentes a dados modelados, como é o caso do SISAM, ressalta-se que a plataforma ainda se constitui como uma das melhores para estudos da qualidade do ar quando não é possível o monitoramento contínuo com técnicas de amostragem avançadas.

## REFERÊNCIAS

1. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution [Internet]. [acessado em 4 fev. 2024]. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
2. Pope 3<sup>rd</sup> CA, Dockery DW. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J Air Waste Manag Assoc* 2006; 56(6): 709-42. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
3. Samet J, Krewski D. Health effects associated with exposure to ambient air pollution. *J Toxicol Environ Health A* 2007; 70(3-4): 227-42. <https://doi.org/10.1080/15287390600884644>
4. Zhang Y, Tingting Y, Huang W, Yu P, Chen G, Xu R, et al. Health impacts of wildfire smoke on children and adolescents: a systematic review and meta-analysis. *Curr Environ Health Rep* 2024; 11(1): 46-60. <https://doi.org/10.1007/s40572-023-00420-9>
5. Organização Pan-Americana da Saúde. Não polua o meu futuro! O impacto do ambiente na saúde das crianças [Internet]. Brasília: Organização Mundial da Saúde; 2018 [acessado em 28 out. 2024]. Disponível em: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/49123>
6. Quintanilha WFL, Maia ML, Bertoncini BV, Ribeiro JP, Cassiano DR, Sousa FW, et al. Evaluation of atmospheric NO<sub>2</sub> levels in public transport corridors. *Transportes* 2021; 29(4): 1-16.
7. Lim SS, Vos T, Flaxman AD, Danaei G, Shibuya K, Adair-Rohani H, et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet* 2012; 380(9859): 2224-60. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61766-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61766-8)
8. Feng S, Gao D, Liao F, Zhou F, Wang X. The health effects of ambient PM<sub>2.5</sub> and potential mechanisms. *Ecotoxicol Environ Saf* 2016; 128: 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.030>
9. United States. Environmental Protection Agency. Third external review draft of air quality criteria for particulate matter. 2002 Apr. Report No.: 1 [Internet]. [acessado em 28 out. 2024]. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exec/ZyNET.exe/30005CR7.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995±Thru±1999&Docs=&Query=&Time=&ndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C95thru99%5Ctxt%5C00000016%5C30005CR7.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>
10. Cohen AJ, Anderson R, Ostro B, Pandey KD, Krzyzanowski M, Künzli N, et al. Urban air pollution. In: Ezzati M, Lopez AD, Rodgers A, Murray CJL. Comparative quantification of health risks. Global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors. Geneva: WHO; 2004. p. 1353-435.
11. Souza PA, Mello WZ, Mariani RL, Sella SM. Caracterização do material particulado fino e grosso e composição da fração inorgânica solúvel em água em São José dos Campos (SP). *Quím Nova* 2010; 33(6): 1247-53. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000600005>
12. Jacobson LSV, Hacon SS, Castro HA, Ignotti E, Artaxo P, Leon ACMP. Association between fine particulate matter and the peak expiratory flow of schoolchildren in the Brazilian subequatorial Amazon: a panel study. *Environ Res* 2012; 117: 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.05.006>
13. Ignotti E, Hacon SS, Junger WL, Mourão D, Longo K, Freitas S, et al. Air pollution and hospital admissions for respiratory diseases in the subequatorial Amazon: a time series approach. *Cad Saude Publica* 2010; 26(4): 747-61. <https://doi.org/10.1590/s0102-311x2010000400017>
14. Romieu I, Gouveia N, Cifuentes LA, Leon AP, Junger W, Vera J, et al. Multicity study of air pollution and mortality in Latin America (the ESCALA study). *Res Rep Health Eff Inst* 2012; (171): 5-86. PMID: 23311234.
15. Atkinson RW, Kang S, Anderson HR, Mills IC, Walton HA. Epidemiological time series studies of PM<sub>2.5</sub> and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis. *Thorax* 2014; 69(7): 660-5. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2013-204492>



16. Costa AF, Hoek G, Brunekreef B, Leon ACMP. Air pollution and deaths among elderly residents of São Paulo, Brazil: an analysis of mortality displacement. *Environ Health Perspect* 2017; 125(3): 349-54. <https://doi.org/10.1289/EHP98>
17. Qu Y, Pan Y, Niu H, He Y, Li M, Li L, et al. Short-term effects of fine particulate matter on non-accidental and circulatory diseases mortality: a time series study among the elder in Changchun. *PLoS One* 2018; 13(12): e0209793. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209793>
18. Liu C, Cai J, Chen R, Sera F, Guo Y, Tong S, et al. Coarse particulate air pollution and daily mortality: a global study in 205 cities. *Am J Respir Crit Care Med* 2022; 206(8): 999-1007. <https://doi.org/10.1164/rccm.202111-2657OC>
19. Vormittag EMPAA, Cirqueira SSR, Wicher Neto H, Saldiva PHN. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. *Estud Av* 2021; 35(102): 7-30. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002>
20. Dominici F, Sheppard L, Clyde M. Health effects of air pollution: a statistical review. *Int Stat Rev* 2003; 71(2): 243-76. <https://doi.org/10.1111/j.1751-5823.2003.tb00195.x>
21. Lepot M, Aubin JB, Clemens FHLR. Interpolation in time series: an introductory overview of existing methods, their performance criteria and uncertainty assessment. *Water* 2017; 9(10): 796-816. <https://doi.org/10.3390/w9100796>
22. Schneider R, Masselot P, Vicedo-Cabrera AM, Sera F, Blangiardo M, Forlani C, et al. Differential impact of government lockdown policies on reducing air pollution levels and related mortality in Europe. *Sci Rep* 2022; 12(1): 726. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04277-6>
23. Sorek-Hamer M, Just AC, Kloog I. Satellite remote sensing in epidemiological studies. *Curr Opin Pediatr* 2016; 28(2): 228-34. <https://doi.org/10.1097/MOP.0000000000000326>
24. Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Atlas do censo demográfico 2010 [Internet]. Brasília: IBGE; 2010 [acessado em 04 fev. 2024]. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/apps/atlas/#/home>
25. Ostro B. Outdoor air pollution: assessing the environmental burden of disease at national and local levels. Geneva: World Health Organization; 2004.
26. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. sistema de transferência de dados [Internet]. 2023 [acessado em 28 ago. 2024]. Disponível em: <https://dataserver-coids.inpe.br/queimadas/queimadas/sisam/>
27. Christophe Y, Bennouna Y, Schulz M, Eskes HJ, Basart S, Benedictow A, et al. Validation report of the CAMS global reanalysis of aerosols and reactive gases, years 2003–2018. European: Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS); 2019.
28. Eskes H, Huijnen V, Arola A, Benedictow A, Blechschmidt AM, Botek E, et al. Validation of reactive gases and aerosols in the MACC global analysis and forecast system. *Geosci Model Dev* 2015; 8: 3523-43. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3523-2015>
29. Inness A, Ades M, Agustí-Panareda A, Barré J, Benedictow A, Blechschmidt AM, et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmos Chem Phys* 2019; 19(6): 3515-56. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>
30. Wang Y, Ma YF, Eskes H, Inness A, Flemming J, Brasseur GP. Evaluation of the CAMS global atmospheric trace gas reanalysis 2003–2016 using aircraft campaign observations. *Atmos Chem Phys* 2020; 20(7): 4493-521. <https://doi.org/10.5194/acp-20-4493-2020>
31. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1986; 1(8476): 307-10. PMID: 2868172.
32. Lin LI. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics* 1989; 45(1): 255-68. PMID: 2720055.
33. Nickerson CAE. A note on "A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility." *Biometrics* 1997; 53(4): 1503-7. <https://doi.org/10.2307/2533516>
34. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing [Internet]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing; 2022 [acessado em 28 out. 2024]. Disponível em: <https://www.R-project.org/>
35. Stevenson M, Sergeant E, Heuer C, Nunes T, Marshall J, Sanchez J, et al. Package epiR: tools for the analysis of epidemiological data [Internet]. [acessado em 04 fev. 2024]. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/epiR/epiR.pdf>
36. Datta D. blandr: a Bland-Altman MethodComparison package for R [Internet]. Zenodo, 2017. [acessado em 28 out. 2024]. Disponível em: <https://github.com/deepankardatta/blandr>
37. Wood SN. Generalized additive models: an introduction with R. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group; 2017.
38. Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. Distributed lag non-linear models. *Stat Med* 2010; 29(21): 2224-34. <https://doi.org/10.1002/sim.3940>
39. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [Internet]. 2021 [acessado em 28 out. 2024]. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
40. Hu Z. Spatial analysis of MODIS aerosol optical depth, PM<sub>2.5</sub>, and chronic coronary heart disease. *Int J Health Geogr* 2009; 8: 27. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-27>
41. Kloog I, Zanobetti A, Nordio F, Coull BA, Baccarelli AA, Schwartz J. Effects of airborne fine particles (PM<sub>2.5</sub>) on deep vein thrombosis admissions in northeastern United States. *J Thromb Haemost* 2015; 13(5): 768-74. <https://doi.org/10.1111/jth.12873>
42. Kloog I, Melly SJ, Ridgway WL, Coull BA, Schwartz J. Using new satellite based exposure methods to study the association between pregnancy pm<sub>2.5</sub> exposure, premature birth and birth weight in Massachusetts. *Environ Health* 2012 18; 11: 40. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-40>

43. Teutschbein C, Seibert J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods. *J Hydrol* 2012; 456-457: 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
44. Hempel S, Frieler K, Warszawski L, Schewe J, Piontek F. A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth Syst Dynam* 2013; 4(2): 219-36. <https://doi.org/10.5194/esd-4-219-2013>
45. Pope 3rd CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 2002; 287(9): 1132-41. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
46. Cohen AJ, Brauer M, Burnett R, Anderson HR, Frostad J, Estep K, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet* 389(10082): 1907-18. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
47. Analitis A, De' Donato F, Scortichini M, Lanki T, Basagana X, Ballester F, et al. Synergistic effects of ambient temperature and air pollution on health in Europe: results from the PHASE project. *Int J Environ Res Public Health* 2018; 15(9): 1856. <https://doi.org/10.3390/ijerph15091856>
48. Abdilllah SF, Wang YF. Ambient ultrafine particle (PM<sub>0.1</sub>): sources, characteristics, measurements and exposure implications on human health. *Environ Res* 2023; 218: 115061. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115061>

## ABSTRACT

**Objective:** To evaluate the performance of satellite-derived PM<sub>2.5</sub> concentrations against ground-based measurements in the municipality of Salvador (state of Bahia, Brazil) and the implications of these estimations for the associations of PM<sub>2.5</sub> with daily non-accidental mortality. **Methods:** This is a daily time series study covering the period from 2011 to 2016. A correction factor to improve the alignment between the two data sources was proposed. Effects of PM<sub>2.5</sub> were estimated in Poisson generalized additive models, combined with a distributed lag approach. **Results:** According to the results, satellite data underestimated the PM<sub>2.5</sub> levels compared to ground measurements. However, the application of a correction factor improved the alignment between satellite and ground-based data. We found no significant differences between the estimated relative risks based on the corrected satellite data and those based on ground measurements. **Conclusion:** In this study we highlight the importance of validating satellite-modeled PM<sub>2.5</sub> data to assess and understand health impacts. The development of models using remote sensing to estimate PM<sub>2.5</sub> allows the quantification of health risks arising from the exposure.

**Keywords:** Air pollution. Public health. Time series. Information systems.

**CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES:** Jacobson, L.V.: Conceituação, Curadoria de dados, Escrita – primeira redação; Escrita – revisão e edição, Investigação, Metodologia. Hacon, S.: Conceituação, Escrita – revisão e edição, Metodologia. Schumacher, V.: Escrita – revisão e edição. Santos, C.P.C.: Escrita – revisão e edição. Vianna, N.: Conceituação, Escrita – revisão e edição, Obtenção de financiamento.

**FONTE DE FINANCIAMENTO:** A pesquisa foi parte do projeto SOPRAR, Salvador, coordenado pela pesquisadora Nelzair Araújo Vianna.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem a Cetrel pela disponibilização dos dados medidos de PM<sub>10</sub> e os dados meteorológicos.

**COMITÊ DE ÉTICA:** Por se tratar de dados secundários de saúde, de domínio público, agregados por município e sem identificação do indivíduo, não necessita aprovação por parte do comitê de ética.



© 2024 | A Epidemio é uma publicação da

Associação Brasileira de Saúde Coletiva - ABRASCO