III SIMPOSIO BRASILEIRO DE BIOMETEOROLOGIA HUMANA
26 a 28 de agosto de 2026

MATERIAL PARTICULADO E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA ESTAÇÃO CHUVOSA AMAZÔNICA: AVALIAÇÃO DO SENSOR DE BAIXO CUSTO SDS011 EM SANTARÉM-PA.

Sarah Suely Alves Batalha (1); João Elbio de Oliveira Aquino Sequeira (2); Elias Sousa Leitão (3); Glauce Vitor da Silva (4); Ana Carla dos Santos Gomes (5)

(1) Doutora em Ciências, Escola de Ensino Técnico do Estado do Pará Francisco Coimbra Lobato, sarah.batalha@docente.sectet.pa.gov.br
(2) Doutor em Relações Internacionais, Escola de Ensino Técnico do Estado do Pará Francisco Coimbra Lobato, joao.sequeira@docente.sectet.pa.gov.br
(3) Mestrando em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação, Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação da Universidade Federal do Oeste do Pará (PROFNIT/Ufopa), elias.leitao3652@escola.seduc.pa.gov.br
(4) Doutora em Ciências Ambientais, Instituto de Formação Interdisciplinar e Intercultural da Universidade Federal do Oeste do Pará (IFII/Ufopa), glaucevitor@yahoo.com.br
(5) Doutora em Ciências Climáticas, Instituto de Engenharia e Geociências da Universidade Federal do Oeste do Pará (IEG/Ufopa), ana.gomes@ufopa.edu.br

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar a associação entre as concentrações de material particulado ($PM_{2,5}$ e PM_{10}) medidas por um sensor de baixo custo e variáveis meteorológicas na estação chuvosa em Santarém-PA. Dados meteorológicos horários do INMET e do CEMADEN foram integrados para as análises estatísticas. As associações entre as variáveis foram avaliadas por meio do coeficiente de correlação de Spearman, teste de Mann-Whitney e regressão linear simples entre PM e temperatura do ar, com processamento realizado em Python no Google Colaboratory. Conclui-se que o sensor SDS011 mostrou-se capaz de capturar padrões atmosféricos coerentes com as condições climáticas do ambiente amazônico, contribuindo para a geração de dados científicos sobre material particulado no local.

Palavras-chave: qualidade do ar; precipitação; monitoramento ambiental; Amazônia.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade do ar é uma temática relevante para a saúde pública e para a gestão ambiental, especialmente na Amazônia brasileira, onde a dinâmica atmosférica é fortemente modulada pela sazonalidade da precipitação e pelos impactos das queimadas (CARMO et al., 2010; ARTAXO et al., 2020; GABARDO et al., 2021). O material particulado (PM) está entre os poluentes atmosféricos de maior risco à saúde humana, sendo associado ao desenvolvimento e agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares, com efeitos mais severos sobre grupos vulneráveis como crianças, idosos e trabalhadores expostos ao ar livre (POPE e DOCKERY, 2006; MISAILIDIS et al., 2020). Apesar de sua importância, o monitoramento da qualidade do ar no Brasil ainda apresenta distribuição desigual, com marcada escassez de estações, em especial na região Norte (VORMITTAG et al., 2021). Nesse contexto, sensores de baixo custo emergem como alternativa promissora para ampliar a cobertura do monitoramento em municípios sem infraestrutura oficial, desde que submetidos a processos adequados de validação e análise (KUMAR et al., 2015).

2. OBJETIVO

Avaliar a associação entre as concentrações de material particulado ($PM_{2,5}$ e PM_{10}) medidas por sensor de baixo custo (SDS011) e variáveis meteorológicas na estação chuvosa em Santarém-PA.

3. MÉTODO

3.1. Área de estudo

O presente estudo foi realizado em Santarém, município de médio porte localizado na mesorregião do Baixo Amazonas, Pará, com população superior a 300 mil habitantes e área territorial de 17.898 km² (IBGE, 2023). O clima é tropical monçônico (Am), com temperaturas médias entre 25°C e 28°C e precipitação anual em torno de 2.200 mm, concentrada entre dezembro e maio (SOUZA et al., 2013; ALVARES et al., 2014). A coleta foi realizada na Escola de Ensino Técnico do Estado do Pará Francisco Coimbra Lobato (EETEPA FCL), localizada na Rodovia Engenheiro Fernando Guilhon.

3.2. Campanha e coleta de dados

Os sensores foram instalados em um pedestal de ferro a 1,2 metro acima do solo. As entradas de ar foram colocadas voltadas para leste, conforme a predominância do vento na região durante o ano todo (MOLINA et al., 2019). A campanha foi realizada entre os dias 13 e 19 de fevereiro de 2025, com medições diurnas das 8h às 18h. O sensor SDS011 operou de forma contínua durante o período da coleta, registrando leituras a cada cinco segundos. Para fins de análise, foram utilizadas as médias horárias, totalizando 11 observações por dia e 71 registros horários ao longo dos sete dias de campanha.

3.3. Sensor SDS011

O sensor de particulado SDS011 integra um kit de monitoramento utilizado no projeto "Cuidadores do Ar", do Grupo de Pesquisas em Ciências Atmosféricas da Amazônia (GPCAA), que, desde 2022, realiza campanhas e períodos de monitoramento da qualidade do ar em Santarém-PA. O SDS011 instalado no kit foi desenvolvido pela *Nova Fitness*, um *spin-off* da Universidade de Jinan (Shandong, China). O sensor utiliza a Placa de Circuito Impresso (do inglês *Printed Circuit Board*, PCB) como um dos lados da caixa, na qual o laser é montado. Os dados adquiridos são armazenados em cartão de memória MicroSD, em formato de texto (.txt). O sensor foi utilizado conforme as especificações do fabricante, sem calibração laboratorial prévia. Kumar et al. (2015) destacam que sensores de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar são sensíveis a condições meteorológicas, especialmente temperatura e umidade relativa. Essa limitação foi considerada na interpretação dos resultados.

3.4. Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos junto ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes à estação automática de Santarém, registrada com código A250. Esta estação está localizada nas coordenadas 2°30'09" S e 54°43'13." W, instalada no 8º Batalhão de Engenharia de Construção (8º BEC) em Santarém-PA, cerca de 14 km do ponto de coleta com o sensor de baixo custo. A estação encontra-se operante e monitora, em periodicidade horária, parâmetros como temperatura, precipitação e pressão atmosférica. Foram requisitados dados dos dias 13 a 19 de fevereiro de 2025, período da campanha de coleta de material particulado. Ao verificar as informações da estação A250, identificaram-se falhas no sensor pluviométrico. Dessa forma, optou-se por utilizar os dados de precipitação das estações pluviométricas do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), que mantém três pluviômetros automáticos no município de Santarém. As estações estão localizadas em três bairros do município: Matinha (2°27'42" S, 54°43'51" W), Jaderlândia (2°28'34" S, 54°41'06" W) e Mapiri (2°25'41" S, 54°44'32" W). Sendo o bairro Matinha o mais próximo do ponto de coleta de material particulado (cerca de 4,7 km).

3.5. Processamento

Os dados brutos do sensor foram organizados em planilha eletrônica, com médias horárias para o período diurno das 8h às 18h, com 11 observações horárias por variável, a cada dia de coleta, totalizando 71 registros horários. As variáveis meteorológicas do INMET e do CEMADEN foram integradas ao conjunto de dados de PM por alinhamento temporal horário, resultando em um banco de dados unificado para análise.

As análises estatísticas foram realizadas no ambiente Google Colaboratory (Google LLC, 2026), plataforma de computação em nuvem baseada em Python acessada por navegador web sem necessidade de instalação local de software. Dado o caráter não paramétrico da distribuição dos dados, a associação entre as concentrações de PM e as variáveis meteorológicas foi avaliada por meio do coeficiente de correlação de Spearman (ρ), cuja significância estatística foi verificada com base nos valores críticos tabelados por Zar (1972). Para comparar as distribuições de $PM_{2,5}$ e PM_{10} entre dias com precipitação acumulada diária igual ou superior a 1 mm e dias sem precipitação significativa, aplicou-se o teste de Mann-Whitney. De forma complementar, realizou-se a regressão linear simples entre as concentrações de PM e a temperatura do ar para quantificar a proporção da variância de PM explicada pela temperatura.

4. RESULTADOS

O ponto de coleta está localizado em área de influência de fontes locais de material particulado, entre as quais destacam-se o tráfego de veículos na Rodovia Engenheiro Fernando Guilhon e a queima de biomassa ao redor da escola, que embora mais intensa na estação seca, pode contribuir para o transporte regional de partículas, mesmo durante o período chuvoso (ANDRADE FILHO et al., 2013; ARTAXO et al., 2020). A realização da campanha na estação chuvosa tende a minimizar a contribuição dessas fontes, uma vez que a precipitação frequente atua na remoção de partículas da atmosfera.

A estatística descritiva indica baixa concentrações de material particulado no período da campanha, com médias de 1,49 µg/m³ para $PM_{2,5}$ e de 3,82 µg/m³ para PM_{10}. Esses valores estão abaixo dos limites recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021), que estabelece 15 µg/m³ para $PM_{2,5}$ e 45 µg/m³ para PM_{10} em valores médios de concentração para exposição em 24 h. Embora os dias de campanha não tenham apresentado expressiva precipitação diária (média de 0,69 mm), esses valores condizem com as condições típicas da estação chuvosa na Amazônia, período em que a precipitação atua como mecanismo conhecido como *washout* (lavagem atmosférica), reduzindo a concentração de poluentes na atmosfera (ANDRADE FILHO et al., 2013; ARTAXO, 2020; CIRINO, 2023).

As associações foram estatisticamente significativas entre as concentrações de material particulado e as variáveis meteorológicas. As correlações mais fortes foram com a precipitação, apresentando coeficientes negativos para $PM_{2,5}$ ($\rho = -0{,}559$, $p < 0{,}001$) e PM_{10} ($\rho = -0{,}517$, $p < 0{,}001$). De acordo com os valores críticos tabelados por Zar (1972) para o coeficiente de Spearman, ambos os resultados superam o limiar crítico para N=71 ao nível de significância de 0,1%, confirmando a robustez estatística das associações encontradas e o papel da chuva como principal mecanismo de remoção de partículas da atmosfera durante a estação chuvosa (ARTAXO et al., 2020). A temperatura do ar apresentou correlação positiva moderada com $PM_{2,5}$ ($\rho = 0{,}408$; $p < 0{,}001$) e fraca com PM_{10} ($\rho = 0{,}341$; $p = 0{,}007$), o que pode sugerir que o aquecimento diurno favorece o aumento das concentrações de partículas por ressuspensão local (SANTOS, CARVALHO E REBOITA, 2016). Esse comportamento pode ser observado na Figura 1, que apresenta o padrão diurno médio das concentrações de material particulado e da temperatura do ar ao longo do período de coleta. Observa-se que as concentrações de PM_{10} apresentam leve redução entre 10h e 11h, seguida de elevação progressiva a partir das 14h, acompanhando o aquecimento da superfície. O $PM_{2,5}$ mantém-se relativamente estável durante a maior parte do dia, com aumento expressivo registrado ao final do período de coleta, às 18h. Presume-se que este evento pode estar associado ao aumento do fluxo de veículos na rodovia adjacente ao ponto de coleta neste horário.

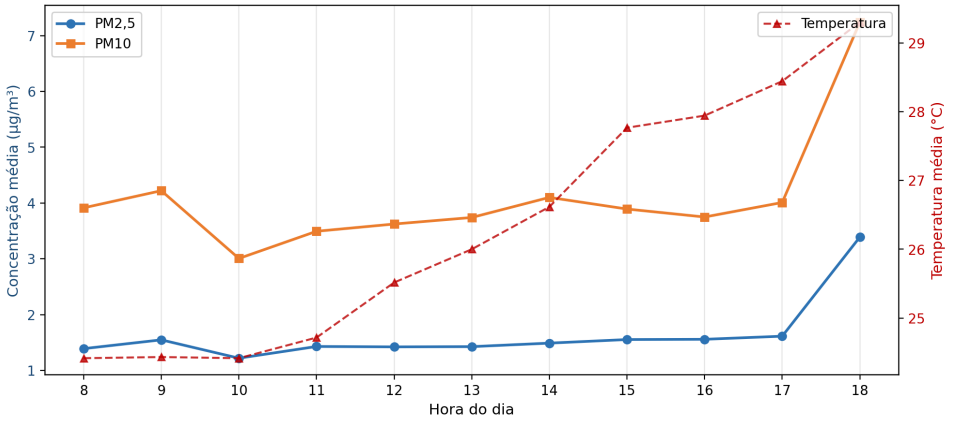


Figura 1 - Padrão diurno médio de Material Particulado (PM) e Temperatura em Santarém-PA, em Fevereiro de 2025.

A regressão linear simples evidenciou associação positiva e estatisticamente significativa entre a temperatura do ar e as concentrações de material particulado. Para $PM_{2,5}$, o modelo explicou 20,6% da variância observada ($R^2 = 0{,}206$; $r = 0{,}454$; $p < 0{,}001$). Para PM_{10}, o poder explicativo foi menor ($R^2 = 0{,}117$; $r = 0{,}342$; $p = 0{,}007$), o que é esperado, uma vez que partículas grossas são mais influenciadas por fatores físicos como velocidade do vento e ressuspensão mecânica do que pelo aquecimento atmosférico.

Os resultados do teste de Mann-Whitney reforçaram o papel da precipitação como principal mecanismo de remoção de material particulado da atmosfera durante a estação chuvosa na região amazônica, apontando diferença estatisticamente significativa nas concentrações de PM entre dias com e sem precipitação ($p < 0{,}001$). No dia com chuva (15 de fevereiro, acumulado de ~89 mm), as médias de $PM_{2,5}$ e

PM_{10} foram de 0,33 µg/m³ e 0,72 µg/m³, respectivamente, representando reduções de aproximadamente 80% e 83% em relação aos dias sem precipitação significativa, que apresentaram médias de 1,68 µg/m³ e 4,33 µg/m³. Na Figura 2, observa-se esse contraste por meio dos *boxplots* para $PM_{2,5}$ e PM_{10}. No dia com chuva (15 de fevereiro), as distribuições de ambos os particulados apresentam baixa variabilidade interna, refletindo a supressão das concentrações pelo evento de precipitação intensa. Nos dias sem chuva, as distribuições são mais amplas, com medianas de 1,65 µg/m³ para $PM_{2,5}$ e 4,21 µg/m³ para PM_{10}, e presença de *outliers* que indicam episódios pontuais de maior concentração.

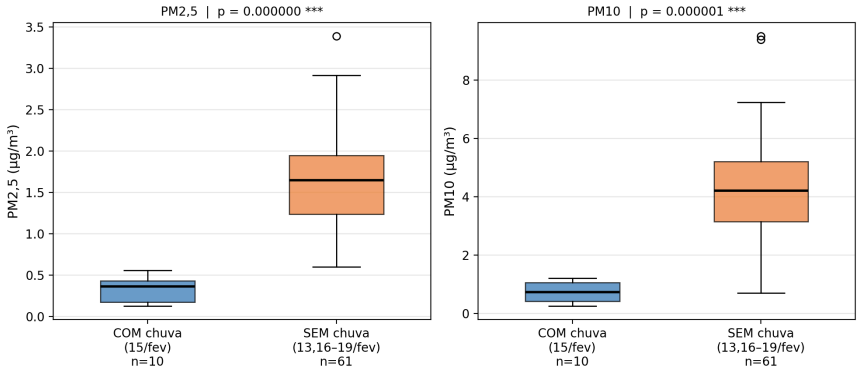


Figura 2 - Concentração de Material Particulado (PM) em dias com e sem chuva em Santarém-PA, em Fevereiro de 2025.

Destaca-se que, neste estudo, apenas um dia compôs o grupo com chuva, correspondendo a um evento de precipitação intensa e isolado, o que limita a generalização dos resultados e será aprofundado em estudos futuros com maior abrangência temporal.

5. CONCLUSÕES

Considerando a falta de estações oficiais de monitoramento e a relevância dos impactos da poluição atmosférica sobre a saúde das populações, o uso do sensor SDS011 mostrou-se capaz de capturar padrões atmosféricos coerentes com as condições climáticas do ambiente amazônico, contribuindo para a geração de dados científicos sobre material particulado no local. Destaca-se que o curto período da campanha e a ausência de alguns dados da estação meteorológica restringiram a generalização dos resultados, sugerindo a necessidade de outras campanhas com maior tempo de duração e abrangência de regimes sazonais. Por fim, recomenda-se a ampliação e continuidade de redes de monitoramento com múltiplos pontos de coleta e a integração de dados meteorológicos na região, dada a importância de se investigar e fortalecer os estudos sobre a qualidade do ar e seus impactos em cidades amazônicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE FILHO, V. S. D., ARTAXO, P., HACON, S., CARMO, C. N. D., & CIRINO, G. (2013). Aerossóis de queimadas e doenças respiratórias em crianças, Manaus, Brasil. Revista de Saúde Pública, 47, 239-247.

CARMO, C. N. D., HACON, S., LONGO, K. M., FREITAS, S., IGNOTTI, E., LEON, A. P. D., & ARTAXO, P. (2010). Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na região sul da Amazônia brasileira. Revista Panamericana de Salud Pública, 27, 10-16.

CIRINO, Glauber et al. Wet deposition of sub-micron aerosol particles in an urban area of the Amazon central. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2023. p. EGU-16945.

GABARDO, G., SARZEDAS, C. G., & SILVA, H. D. (2021). Queimadas na Amazônia brasileira: Brasil em chamas. A educação ambiental em uma perspectiva interdisciplinar. Disponível em: https://downloads.editoracientífica. org/articles/200800872. pdf.

GOOGLE. Google Colaboratory (Google Colab). Mountain View: Google LLC, 2026. Disponível em: https://colab.research.google.com/. Acesso em: 30 maio 2026.

KUMAR, P. et al. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. Environment International, v. 75, p. 199-205, 2015

MANISALIDIS, I. et al. Environmental and health impacts of air pollution: a review. Frontiers in Public Health, v. 8, p. 14, 2020.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Genebra: OMS, 2021.

POPE, C. A., 3rd, & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. Journal of the Air & Waste Management Association (1995), 56(6), 709–742. https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485

SANTOS, Tailine Corrêa; CARVALHO, Vanessa Silveira Barreto; REBOITA, Michelle Simões. Avaliação da influência das condições meteorológicas em dias com altas concentrações de material particulado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 21, n. 02, p. 307-313, 2016.

VORMITTAG, E. M. P. A. de A.; CIRQUEIRA, S. S. R.; WICHER NETO, H.; SALDIVA, P. H. N. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. Estudos Avançados, v. 35, n. 102, p. 7–30, 2021.Disponível em: https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002

ZAR, J. H. Significance testing of the Spearman rank correlation coefficient. Journal of the American Statistical Association, v. 67, n. 339, p. 578–580, 1972