

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”****AVALIAÇÃO DA TENDÊNCIA DA QUALIDADE DO AR NA REGIÃO DO MÉDIO PARAÍBA, RIO DE JANEIRO**Thiago Pamponete Lopes<sup>1</sup> (IC), Vanessa Silveira Barreto Carvalho (PQ)<sup>1</sup><sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave:** Mann Kendall, Poluição Atmosférica, Urbanização**Introdução**

Estrategicamente localizada entre as duas maiores metrópoles brasileiras, São Paulo e Rio de Janeiro, a Região do Médio Paraíba (RMP-RJ) se consolida como um importante pólo de desenvolvimento nacional. Com uma população de aproximadamente 855 mil habitantes, a região é marcada pelo intenso fluxo veicular da Rodovia Presidente Dutra (BR-116) e pela força de seu parque industrial. Setores de base como siderurgia, automotivo e de serviços impulsionam a economia local, com a presença de grandes indústrias como a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Volta Redonda, a MAN Latin America, em Resende, e a Saint-Gobain Canalização, em Barra Mansa, por exemplo. O vigor industrial da região é evidenciado por uma notável taxa de crescimento populacional de 536% entre 1940 e 2010, um índice superior ao registrado pelo estado do Rio de Janeiro e pelo Brasil no mesmo intervalo (Ferreira et al., 2013).

Por outro lado, esse crescimento acelerado trouxe consigo problemas ambientais significativos, especialmente relacionados à qualidade do ar (Figueiredo, 2016; Gioda, 2004). A queima de combustíveis fósseis, tanto pela frota de veículos quanto pelos processos industriais, eleva a concentração de poluentes na atmosfera representando um risco direto à saúde pública e ao meio ambiente (OMS, 2021). Tal cenário torna necessária a adoção de políticas públicas eficazes, como os programas de controle de emissões veiculares tal qual o PROCONVE, cuja efetividade já foi observada em outras metrópoles brasileiras (Andrade et al., 2017).

Nesse contexto, a análise de tendências da qualidade do ar surge como uma ferramenta para diagnosticar a evolução do cenário ambiental ao longo do tempo (Zeri et al., 2011). Esses estudos possibilitam verificar se as regiões apresentam tendências de aumento ou de redução, fornecendo referenciais para avaliar a efetividade das ações de controle já implementadas e orientar o planejamento de novas

políticas públicas. Considerando esse panorama, o presente trabalho tem como objetivo analisar a tendência temporal e espacial da qualidade do ar na RMP-RJ, no período de 2004 a 2023.

**Metodologia**

Para a avaliação da qualidade do ar, foram analisados os dados médios horários de concentração dos poluentes: monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e material particulado inalável (PM<sub>10</sub>). Os dados foram registrados em 13 estações de monitoramento alocadas na RMP-RJ entre 2004 e 2023: BM01 (Sesi), BM02 (Boa Sorte), BM03 (Roberto Silveira), BM04 (Bocaninha), BM05 (Vista Alegre), IT01 (Campo Alegre), PR01 (Porto Real), QT01 (Bom Retiro), RS01 (Cidade Alegria), RS02 (Casa da Lua), VR01 (Santa Cecília), VR02 (Retiro) e VR03 (Belmonte).

Os dados foram obtidos a partir do Sistema Integrado de Gestão da Qualidade do Ar (SIGQAR) do Instituto Estadual do Ambiente (INEA). O PM<sub>10</sub> foi monitorado em todas as estações, enquanto a cobertura para os poluentes gasosos foi restrita a um subconjunto de seis estações para SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> (PR01, QT01, RS02, VR01, VR02, VR03) e cinco para CO (excluindo-se a PR01). Para o PM<sub>10</sub> e o SO<sub>2</sub>, foram calculadas as médias diárias de 24 horas, sendo incluídos no cálculo apenas os dias que apresentaram um mínimo de 75% de dados horários válidos. Para os poluentes O<sub>3</sub> e CO, foi determinada a maior média móvel de 8 horas (MA8H) para cada dia, também respeitando o critério de 75% de dados válidos para o cálculo. Por fim, para o NO<sub>2</sub>, foi selecionada a maior concentração média horária registrada em cada dia.

A análise da tendência das concentrações dos poluentes foi realizada por meio do teste não paramétrico de *Mann-Kendall* (Mann, 1945; Kendall, 1975; Hussain et al., 2019). Este método avalia a existência de tendências monotônicas (de crescimento ou decrescimento) em séries de dados, comparando cada

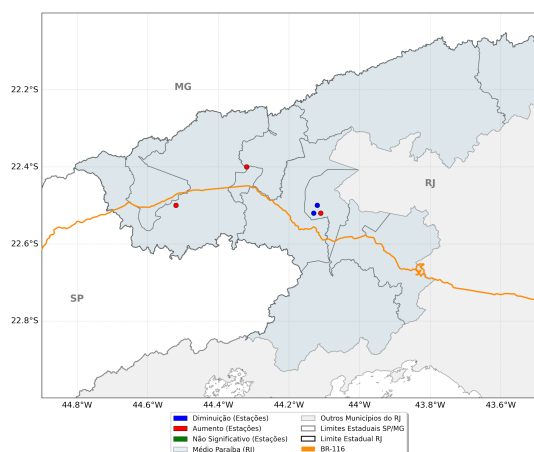
**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

valor com os subsequentes para determinar a consistência da tendência. O teste foi aplicado individualmente sobre a série histórica das métricas diárias de cada poluente em cada estação de monitoramento. A magnitude da tendência foi quantificada pelo estimador de inclinação de Sen (Sen, 1968). A aplicação conjunta destes testes é uma abordagem consolidada para a análise de séries temporais de dados de poluição (Gilbert, 1987). Foram consideradas estatisticamente significativas as tendências que apresentaram valor-p inferior a 0,05. Para as tendências consideradas significativas, a direção foi classificada com base no sinal da estatística S de Mann-Kendall. Um sinal positivo para a estatística S indicou uma tendência de aumento, e um sinal negativo, uma tendência de diminuição.

### Resultados e discussão

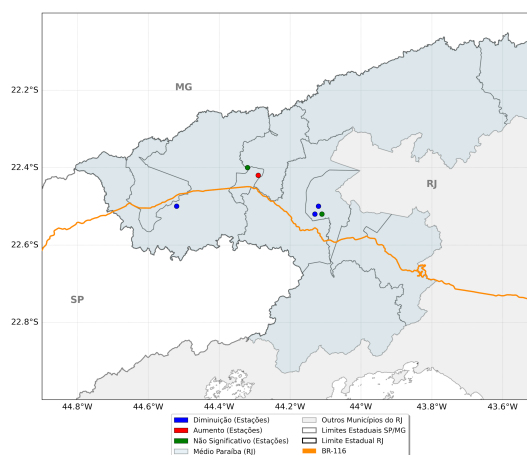
A tendência para o CO (Figura 1) revelou um padrão espacial claro na RMP-RJ uma vez que tendências significativas de aumento foram verificadas na porção oeste (RS02 e QT01), com maior influência da BR-116, enquanto a VR03 apresentou a mesma tendência de aumento em Volta Redonda. Por outro lado, outras estações de Volta Redonda (VR01 e VR02) apresentaram tendência de redução nas concentrações de CO. O CO é um poluente primário característico da queima incompleta de combustíveis, sendo um excelente indicador da emissão por veículos automotores (Carvalho et al., 2015). Logo, este resultado sugere fortemente que as emissões de veículos representam um fator de pressão relevante para a qualidade do ar na região.

**Figura 1** – Tendência para Monóxido de Carbono



Dentre os poluentes analisados, o NO<sub>2</sub> demonstrou um comportamento mais distinto, com indicações de diminuição, aumento e ausência de tendência significativa nas estações analisadas (Figura 2). Destaca-se aqui a estação PR01 de Porto Real, sendo a única demonstrando aumento diante das outras. A não uniformidade das tendências sugere que as concentrações de NO<sub>2</sub> sejam influenciadas por diferentes fontes de emissão de poluentes atmosféricos na região.

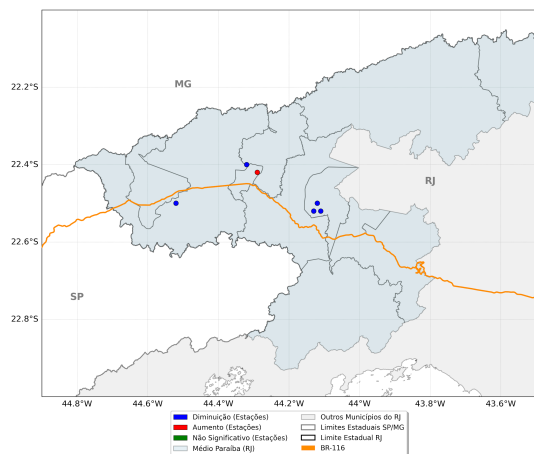
**Figura 2** – Tendência para Dióxido de Nitrogênio



A análise para o O<sub>3</sub> troposférico está ilustrada na Figura 3, onde a tendência de aumento foi verificada apenas na PR01, todas as outras estações de monitoramento da região demonstram diminuição. Este resultado é particularmente relevante, pois o O<sub>3</sub> é um poluente secundário, formado na atmosfera pela reação fotoquímica de poluentes precursores, como os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis (COVs) (Seinfeld; Pandis, 2016). Nota-se que a tendência de aumento do O<sub>3</sub> foi verificada justamente na estação PR01 que registrou elevação na concentração de precursores, como no caso do NO<sub>2</sub>, indicando que as condições nesta localidade permanecem favoráveis à sua formação, representando um risco à saúde.

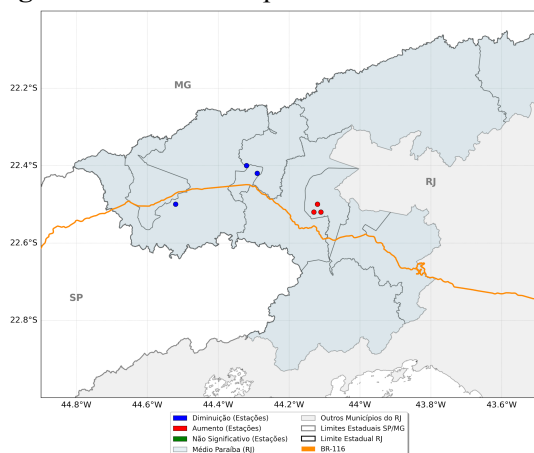
**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

**Figura 3 – Tendência para Ozônio**



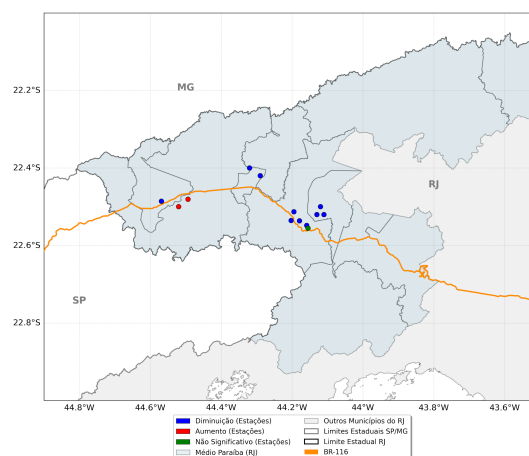
As tendências para o SO<sub>2</sub> estão apresentadas na Figura 4, onde nota-se dois padrões espaciais diferentes. As estações de monitoramento de Volta Redonda (VR01, VR02 e VR03) demonstram aumento significativo nas concentrações, enquanto as estações PR01, QT01 e RS02 indicam tendência de diminuição. O aumento isolado no município de Volta Redonda sugere fortemente a influência da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), importante fonte estacionária com intensa atividade siderúrgica nas proximidades das estações locais, e indica a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade do ar na região. Além disso, as tendências de redução observadas nas demais estações são igualmente relevantes, pois demonstram avanços no controle das emissões, especialmente, no controle de emissões de veículos pesados.

**Figura 4 – Tendência para Dióxido de Enxofre**



As tendências de PM<sub>10</sub> na RMP-RJ (Figura 5) evidenciam predominância de redução significativa em diversas estações, indicando avanços possivelmente relacionados à implementação de programas de controle de emissões veiculares, como o PROCONVE e o PROMOT, que vêm contribuindo para a redução dos poluentes emitidos pela frota automotiva (Carvalho et al., 2015; Santos et al., 2016). Contudo, algumas estações, especialmente em Resende (RS01 e RS02), apresentaram aumento nas concentrações, sugerindo possível influência de fontes locais específicas e do tráfego intenso na BR-116. Esse contraste espacial nos resultados reforça a heterogeneidade das pressões antrópicas na região e destaca a necessidade de monitoramento contínuo e integrado.

**Figura 5 – Tendência para Material Particulado Inalável (PM<sub>10</sub>)**



## Conclusões

O objetivo deste estudo foi avaliar a tendência espacial e temporal da concentração de poluentes na Região do Médio Paraíba (RMP-RJ) entre os anos de 2004 e 2023. A partir da análise de dados foi avaliado que a evolução da qualidade do ar na região é marcada por uma heterogeneidade espacial, consequência direta da diversidade de fontes emissoras de poluentes atmosféricos na região. A análise confirmou a forte influência da Rodovia Presidente Dutra (BR-116) e de fontes pontuais (complexos industriais, como a MAN Latin America e CSN). Os resultados indicam uma clara associação entre as tendências de aumento de poluentes primários, como CO e PM<sub>10</sub>, com o tráfego intenso da BR-116, especialmente nos municípios a oeste. Em

**“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**

contrapartida, as emissões industriais mostraram-se determinantes para as tendências de SO<sub>2</sub> em Volta Redonda, vinculadas à atividade siderúrgica, e para o aumento de NO<sub>2</sub> e do O<sub>3</sub> em Porto Real. Apesar de avanços significativos, como a redução predominante de PM<sub>10</sub> possivelmente associada às políticas de controle veicular, a persistência de "hotspots" de poluição demonstra que as pressões do desenvolvimento econômico ainda superam a eficácia das medidas de controle em pontos críticos. Para a continuação deste estudo, o alinhamento com dados meteorológicos se torna essencial para entender a dinâmica da qualidade do ar na região. Portanto, o estudo conclui que a gestão da qualidade do ar na RMP-RJ demanda políticas públicas específicas e direcionadas para cada localidade, reforçando a indispensabilidade da continuidade e expansão da rede de monitoramento para subsidiar ações de controle mais eficazes.

**Agradecimentos**

Os autores agradecem à UNIFEI, à FAPEMIG, à CAPES e ao CNPq pelo apoio que permitiu a realização deste estudo.

**Referências**

- ANDRADE, M. F. *et al.* Air quality in the megacity of São Paulo: evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric Environment**, v. 159, p. 66-82, 2017. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.03.052.
- CARVALHO, V. S. B. *et al.* Air quality status and trends over the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil as a result of emission control policies. **Environmental Science & Policy**, v. 47, p. 68-79, 2015. DOI: 10.1016/j.envsci.2014.10.015.
- FERREIRA, André; LEOPOLDI, Maria Antonieta; AMARAL, Marcelo Gonçalves. Poder público local, universidades e desenvolvimento regional: uma análise da Região do Médio Paraíba Fluminense. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 10, n. 1, p. 119-147, 2014.
- FIGUEIREDO, Isabel Peralva. **Avaliação de emissões atmosféricas na indústria siderúrgica sob a ótica do controle e monitoramento**: o caso da CSN. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016279.pdf>.
- GIODA, A. *et al.* Evaluation of air quality in Volta Redonda, the main metallurgical industrial city in Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 15, n. 6, p. 856–864, 2004. DOI: 10.1590/S0103-50532004000600010.
- GILBERT, Richard O. **Statistical methods for environmental pollution monitoring**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987.
- HUSSAIN, M. I. *et al.* pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 39, p. 1556, 2019. DOI: 10.21105/joss.01556.
- KENDALL, M. G. **Rank correlation measures**. London: Charles Griffin, 1975.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945. DOI: 10.2307/1907187.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
- 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. 2, p. 307-313, 2016. DOI: 10.1590/S1413-4152201600100123511.
- SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
- ZERI, M.; SOUZA, R. A. F. de; GOUVÊA, R. Y. Análise de tendência da concentração de poluentes em dois grandes centros urbanos do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 547-556, 2011. DOI: 10.1590/S0102-77862011000400006.