

IMPACTO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA POR FERRO E ENXOFRE NA QUALIDADE DA ÁGUA E DO AR EM VOLTA REDONDA – RJ

João Victor de Oliveira Peixoto **Leal**¹, Ana Carolina Vasques **Freitas**², Edison Aparecido **Laurindo**³

(1 – Universidade Federal de Itajubá (Unifei), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, joovictorleal@unifei.edu.br, <https://orcid.org/0009-0009-9661-2725>; 2 – Universidade Federal de Itajubá (Unifei), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, ana.freitas@unifei.edu.br, <https://orcid.org/0000-0002-2633-2607>; 3 – Universidade Federal de Itajubá (Unifei), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, edisonlaurindo@unifei.edu.br, <https://orcid.org/0000-0002-0679-3983>)

Resumo: A constante evolução e expansão industrial traz consigo um grande desafio a ser gerido pela sociedade. A emissão crescente de poluentes na atmosfera devido a processos industriais tem acarretado o agravamento de doenças e causado a intensificação do efeito estufa no planeta Terra. Este trabalho buscou analisar a presença dos poluentes atmosféricos ferro e enxofre na água da chuva e na água do rio Paraíba do Sul em Volta Redonda - RJ, bem como realizar uma pesquisa acerca do incômodo população residente à poluição atmosférica. Observou-se forte ocorrência de chuva ácida na região, especialmente no final do período de estiagem. As concentrações de ferro na água da chuva foram 4 vezes maior que no rio Paraíba do Sul no final do período seco. Os padrões de ventos predominantes corroboraram com as concentrações observadas nas estações de monitoramento do ar, sendo maiores no bairro mais próximo a siderúrgica. O resultado da pesquisa de opinião evidenciou também que 80,9% dos moradores de Volta Redonda se sentem extremamente ou muito incomodados com a poluição do ar. Pode-se concluir que a chuva tem papel fundamental na melhora da qualidade do ar e um melhor controle desta pode auxiliar na melhoria da qualidade da água.

Palavras-chave: Poluentes atmosféricos; Qualidade do ar; Água da chuva.

IMPACT OF AIR POLLUTION BY IRON AND SULFUR ON WATER AND AIR QUALITY IN VOLTA REDONDA - RJ

Abstract: The constant evolution and industrial expansion bring a significant challenge for society to manage. The increasing emission of pollutants into the atmosphere due to industrial processes has led to the worsening of diseases and the intensification of the greenhouse effect on planet Earth. This study aimed to analyze the presence of atmospheric pollutants iron and sulfur in rainwater and the water of the Paraíba do Sul River in Volta Redonda - RJ, as well as conduct research on the discomfort felt by local residents regarding air pollution. A strong occurrence of acid rain was observed in the region, especially at the end of the dry season. The iron concentrations in rainwater were four times higher than in the Paraíba do Sul River at the end of the dry period. The prevailing wind patterns corroborated the concentrations observed at air monitoring stations, being higher in the neighborhood closest to the steel plant. The results of the opinion survey also revealed that 80.9% of Volta Redonda residents feel extremely or very bothered by air pollution. It can be concluded that rain plays a fundamental role in improving air quality, and better control of it could contribute to water quality enhancement.

Keywords: Atmospheric pollutants; Air quality; Rainwater.

IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR HIERRO Y AZUFRE EN LA CALIDAD DEL AGUA Y DEL AIRE EN VOLTA REDONDA – RJ

Resumen: La constante evolución y expansión industrial trae consigo un gran desafío que debe ser gestionado por la sociedad. La creciente emisión de contaminantes en la atmósfera debido a procesos industriales ha agravado enfermedades y causado la intensificación del efecto invernadero en el planeta Tierra. Este trabajo buscó analizar la presencia de contaminantes atmosféricos, hierro y azufre, en el agua de lluvia y en el río Paraíba do Sul en Volta Redonda - RJ, así como realizar una investigación sobre la incomodidad de población residente ante la contaminación atmosférica. Se observó una fuerte ocurrencia de lluvia ácida en la región, especialmente al final del período de sequía. Las concentraciones de hierro en el agua de lluvia fueron cuatro veces mayores que en el río Paraíba do Sul al final del período seco. Los patrones de viento predominantes corroboraron con las concentraciones observadas en las estaciones de monitoreo del aire, siendo mayores en el barrio más cercano a la siderúrgica. El resultado de la encuesta de opinión también evidenció que el 80,9% de los habitantes de Volta Redonda se sienten extremadamente o muy incómodos por la contaminación del aire. Se puede concluir que

la lluvia tiene un papel fundamental en la mejora de la calidad del aire y un mejor control de esta puede ayudar a mejorar la calidad del agua.

Palabras clave: Contaminantes atmosféricos; Calidad del aire; Agua de lluvia.

1 - Introdução

O contínuo aumento das emissões de poluentes atmosféricos vem se tornando um grande desafio a ser enfrentado pela sociedade. Processos industriais, exploração mineral e queimadas representam atividades potencialmente poluentes da atmosfera (LINS *et al.*, 2020). Desastres ambientais, agravamento de doenças respiratórias, cardiovasculares, neurológicas, queda da produtividade agrícola e prejuízos econômicos são os principais impactos gerados pela poluição e emissão de gases de efeito estufa desenfreada, havendo ainda poucas medidas mitigadoras sendo implementadas para o combate desse problema em escala global (IEMA, 2014).

Poluentes atmosféricos, provenientes de fontes industriais, penetram nas vias respiratórias, ocasionando o desenvolvimento de doenças respiratórias crônicas e cardiovasculares, mesmo que as concentrações estejam dentro dos padrões de legislação (SERPA *et al.*, 2022). Estima-se que, a cada ano, “a exposição à poluição do ar cause 7 milhões de mortes prematuras e resulte na perda de milhões de anos de vida saudáveis” (OMS, 2021).

O Brasil enfrenta desafios significativos no controle das emissões atmosféricas, principalmente devido às mudanças de uso da terra e floresta (46% das emissões totais), seguido pelos setores agropecuário (27%), energético (18%), processos industriais (4%) e resíduos (3,9%) (SEEG, 2023).

Nesse sentido, resoluções ambientais foram propostas a fim de mitigar e controlar as emissões de poluentes atmosféricos no Brasil. A Resolução nº 506 de 2024 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), dispõe sobre os padrões de qualidade do ar no Brasil, e define poluente atmosférico como “qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público [...]” (BRASIL, 2024).

Uma grave consequência da poluição atmosférica desenfreada é a deposição de poluentes em corpos hídricos, seja diretamente por via seca, devido a sedimentação de partículas maiores, ou indiretamente por via úmida, como o carreamento de partículas pela ocorrência de chuva (DHARAKA e PRIYANTHA, 2023). Esse problema afeta a saúde dos

peixes e de todos que utilizam dessa água para viver, sendo que a poluição ambiental causa danos ao DNA das espécies (SILVA *et al.*, 2019).

A composição química da água da chuva pode fornecer informações a respeito da qualidade do ar em uma determinada localização devido às fontes emissoras locais e aquelas provenientes de transporte a longa distância (ODUBER *et al.*, 2020; ZENG *et al.*, 2024). Isso acontece devido a água da chuva remover aerossóis da atmosfera, seja na formação das nuvens, quando estes agem como núcleos de condensação, ou durante a ocorrência da chuva, quando os aerossóis são arrastados pelas gotas de água durante a queda (AUDOUX *et al.*, 2023). A chuva ácida é causada pela emissão de óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x) na atmosfera, os quais se combinam com a umidade e precipitam como ácido sulfúrico e ácido nítrico, respectivamente (SARIKULOV, 2024). Assim, os impactos dos poluentes presentes no ar sobre os ecossistemas merecem atenção, já que podem ocasionar a acidificação das águas da chuva e sua deposição impactar os corpos d'água e os biomas aquáticos (ZHANG *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o rio Paraíba do Sul, o mais importante do Estado do Rio de Janeiro, tem parte de seu curso dentro do município de Volta Redonda, e é a principal fonte de água para o abastecimento público na cidade e no estado (AVELLAR, 2015). Por esse motivo, a preservação deste importante rio é fundamental, visto sua importância ambiental, social e econômica.

O município de Volta Redonda abriga a terceira maior siderúrgica do Brasil, a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), construída na cidade por volta de 1941. A empresa se enquadra hoje como a segunda maior exportadora de minério de ferro do Brasil e a sexta do mundo, e tem, também, participação na produção de cimento e aço como uma de suas atividades produtivas (CSN, 2024).

Pelo fato de a indústria siderúrgica ser grande consumidora de energia e de recursos naturais não renováveis, ela é responsável “por significativo volume de efluentes gasosos e líquidos, bem como de resíduos sólidos, especialmente nas etapas de coqueria, sinterização e produção de gusa no alto forno” (CAVALCANTI, 2012).

Assim, financeiramente, a CSN é muito importante para a economia do Brasil, além de gerar grande quantidade de empregos. Entretanto, a poluição desenfreada emitida pela indústria vem sendo motivo de debates e insatisfação, principalmente da população residente na cidade (G1, 2023). O principal poluente que é visivelmente encontrado no município é o pó preto, que

contém minúsculas partículas de ferro, e que, diariamente, é depositado nas casas dos moradores e inalado quando presente no ar (SIQUEIRA, FONTANA e MONTEIRO, 2024). Além do ferro, outros metais estão presentes na composição do material particulado presente nas regiões vizinhas à siderúrgica, pois Borges *et al.* (2024) reportaram a exposição excessiva da população local ao níquel oriundo da atividade siderúrgica na região.

O Material Particulado (MP), um dos poluentes emitidos pela indústria siderúrgica, é definido como um tipo de material formado por partículas sólidas e líquidas, cuja composição química depende das fontes naturais ou antropogênicas e de processos químicos e físicos de transformação que ocorrem durante seu transporte na atmosfera, sendo classificado conforme o seu tamanho; quanto menor, maior é a sua capacidade de penetrar no sistema respiratório e causar impactos à saúde (SANTOS, REIS e GALVÃO, 2022).

Assim, em termos de tamanho aerodinâmico, o MP pode ser classificado como: Partículas totais em Suspensão (PTS, cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 50 μm), MP_{10} (partículas com diâmetro menor ou igual a 10 μm), $MP_{2,5}$ (diâmetro menor ou igual a 2,5 μm) e partículas sedimentáveis (PS), as quais se depositam nas superfícies (SANTO, REIS e GALVÃO, 2022).

Nesse contexto, Oliveira *et al.* (2020) encontraram que o MP_{10} apresentou 60 violações em Volta Redonda, no período de janeiro de 2013 a dezembro de 2015, em relação ao padrão estabelecido pela OMS de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, e a sua exposição esteve associada à inúmeras internações hospitalares por doenças respiratórias.

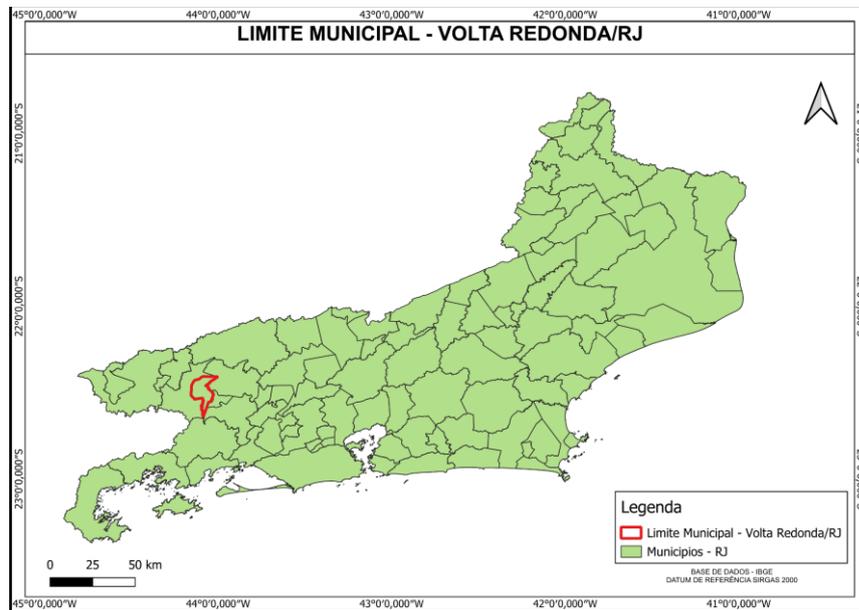
Em função dessa problemática, pretende-se com este trabalho, determinar a concentração de ferro na forma de Fe^{2+} através da conversão do ferro total e enxofre na forma de SO_4^{2-} , presentes na água da chuva e na água do rio Paraíba do Sul em Volta Redonda - RJ, visando correlacionar esses resultados com a qualidade do ar na região. Isso possibilitará uma melhor compreensão dos impactos da poluição atmosférica nos recursos hídricos do município, o que poderá subsidiar medidas que promovam melhor controle da qualidade do ar, propiciando mais saúde e qualidade de vida para a população residente. O trabalho pretende, ainda, verificar o nível de incômodo da população com a poluição atmosférica na região.

1.1 Área de estudo

Localizada no Estado do Rio de Janeiro, Volta Redonda (Figura 1) é conhecida por abrigar uma das maiores siderúrgicas do Brasil, a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

A cidade é cortada pelo rio Paraíba do Sul (Figura 2), principal fonte de abastecimento de água da cidade (SAAE-VR, [s.d.]).

Figura 1: Localização do município de Volta Redonda no Estado do Rio de Janeiro.



Fonte: Autor (2024).

Figura 2: Localização do rio Paraíba do Sul e seus afluentes na cidade de Volta Redonda.



Fonte: Autor (2024) utilizando software QGIS e imagens do Google Earth.

Cerca de 99,95% da população residente na cidade é atendida com abastecimento de água e 98,91% da população é atendida com esgotamento sanitário, números bem acima da média para o estado e para o país (IAS, 2022).

A população estimada de Volta Redonda é de 261 mil habitantes, distribuídos em uma área de 182,105 km². Em número de habitantes, é a maior cidade do Sul Fluminense e a terceira maior do interior do estado (IBGE, 2022a). Uma pesquisa do IBGE em 2008 contabilizou a emissão de MP_{10} e SO_2 , e classificou Volta Redonda como a segunda cidade com a maior vocação poluidora do estado, ficando atrás somente da capital, Rio de Janeiro (IBGE, 2008).

O clima da cidade é subtropical úmido, com verões quentes e chuvosos e invernos secos, apresentando precipitação anual total variando entre 1.300 e 1.600 mm (SANTOS e DUARTE, 2021). Além disso, Volta Redonda está localizada em fundo de vale (DANTAS, 2000), o que intensifica a poluição da cidade, pois a dispersão dos gases poluentes acaba sendo menos eficiente.

2 - Metodologia

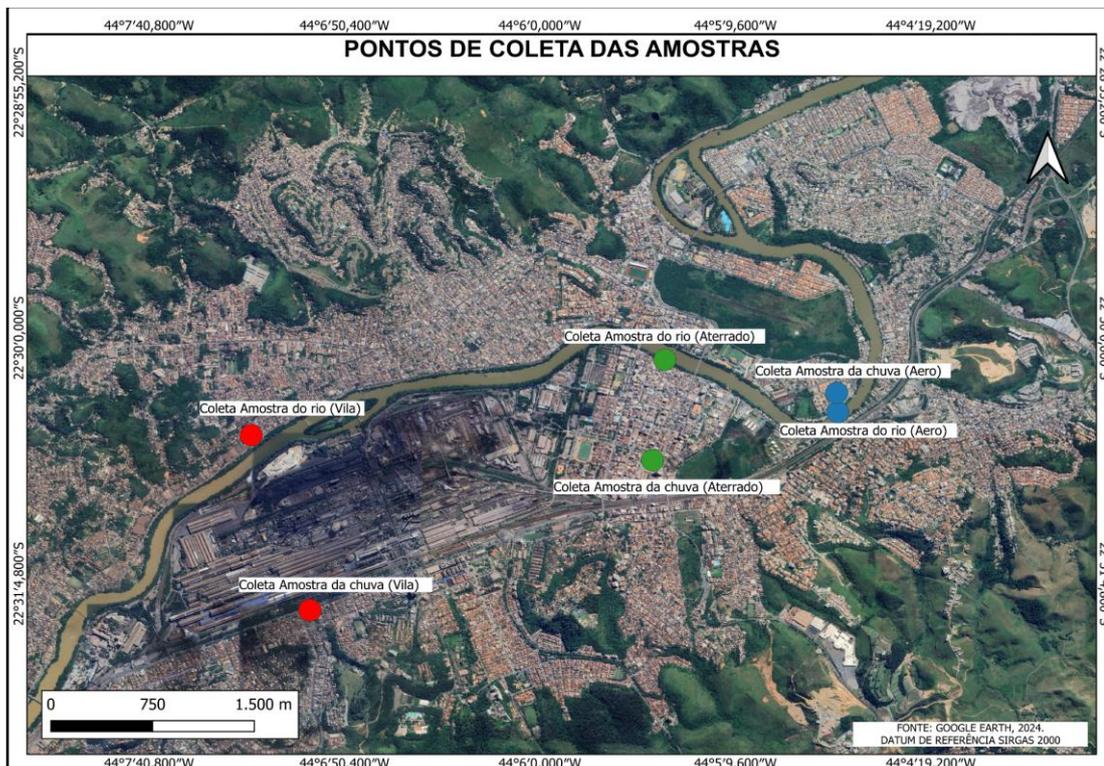
Para a criação dos mapas apresentados foi utilizado o *software* Qgis. As camadas utilizadas para a elaboração das Figuras 1 e 2 foram a malha hidrográfica do rio Paraíba do Sul, obtida por meio da ANA (2017), e os limites municipais do Estado, obtido por meio do IBGE (2022b). O Datum de referência empregado foi o SIRGAS 2000.

Na etapa de coleta de amostras, foram selecionados 3 pontos diferentes para a coleta de amostras de água da chuva e 3 pontos para a coleta de amostras de água do rio (Figura 3). Esses pontos são localizados em 3 bairros diferentes, sendo o primeiro deles o bairro Vila Santa Cecília, local no qual a maior parte da indústria siderúrgica está inserida. O segundo bairro é o Aterrado, que está localizado mais ao centro da cidade. E, por fim, o último bairro é o Aero Clube, o qual se encontra mais afastado da siderúrgica. Em termos de distância com relação a chaminé da siderúrgica, no bairro Vila Santa Cecília o ponto da amostra do rio se localiza a aproximadamente 950 m da chaminé e o da amostra da chuva a 1080 m. Já no bairro Aterrado, o ponto da amostra do rio até a chaminé é de aproximadamente 2400 m e da amostra de chuva é 2100 m. Por fim, no bairro Aero Clube, o ponto da amostra do rio até a chaminé é de aproximadamente 3600 m e da amostra de chuva é 3500m.

As coletas foram realizadas em dois períodos distintos: chuvoso (verão) e na primeira chuva após a estiagem (final do inverno). Para a coleta de amostras de chuva foi utilizado um coletor de garrafa pet, similar ao utilizado por Formigosa *et al.* (2013), com 1 metro de distância do solo para evitar respingos, e com uma tela de nylon (0,5 mm) para evitar contato com insetos

e outros sedimentos (Figura 4). A água do rio Paraíba do Sul foi coletada na superfície e próximo a margem.

Figura 3: Pontos de coleta das amostras nos três bairros selecionados.



Fonte: Autor (2024) com base em imagens do Google Earth (2024).

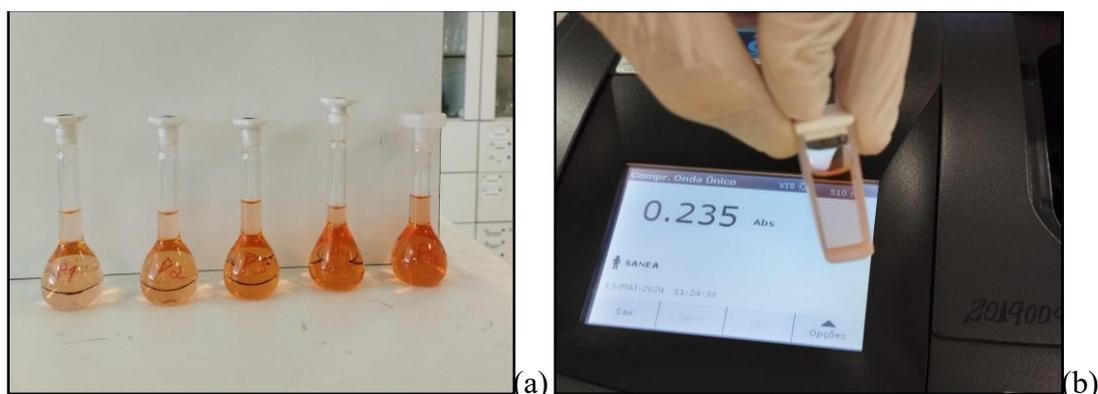
Figura 4: Coletor de chuva utilizado neste estudo com base em Formigosa et al. (2013).



Fonte: Autor (2024).

As análises da concentração de ferro foram realizadas seguindo o procedimento descrito na NBR 13934, que consiste na determinação pelo método colorimétrico da ortofenantrolina (ABNT, 1997). Contudo, foi necessário alterar a concentração de hidroxilamina e ortofenantrolina para 100 mg.L⁻¹, além da redução do volume final das soluções para 25 ml, de modo a intensificar a formação do complexo entre o ferro e a ortofenantrolina e reduzir a geração de resíduos. Por meio deste método, o ferro, inicialmente na forma de ferro total, foi convertido para Fe²⁺. Utilizando um espectrofotômetro UV-Vis da marca Hach, modelo DR 5000, foi construída uma curva padrão de absorvância em função de concentrações conhecidas de ferro [Figura 5 (a) e (b)], no comprimento de onda de 510 nm. Todas as vidrarias utilizadas foram devidamente descontaminadas. Assim, tendo-se a curva de calibração foi possível efetuar a leitura das absorvâncias das amostras, com posterior determinação de suas concentrações.

Figura 5 a) Ilustração das soluções padrões utilizados na montagem da curva padrão para a determinação do ferro e b) espectrofotômetro UV vis.



Fonte: Autor (2024).

Para a determinação do enxofre na forma de íon sulfato, também foi utilizado o método espectrofotométrico, método Hach “680 Sulfato”, com a adição do *kit* “SulfaVer 4” à amostra. Este método se baseia na turbidez das reações entre sulfato e o reagente, em que quanto mais sulfato presente no meio maior a turbidez. Esses valores já são todos padronizados no espectrofotômetro, não sendo necessário a construção da curva de calibração. É importante ressaltar que a leitura da concentração do enxofre na forma de (SO₄)²⁻ é realizada pelo espectrofotômetro na forma de um número inteiro, ou seja, cada valor pode estar dentro de um intervalo na casa decimal que vai de n = 0 até n = 9.

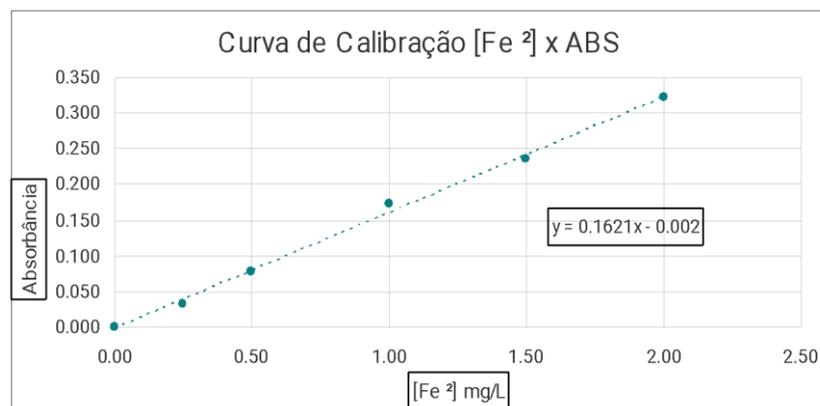
Os dados das estações de monitoramento do ar e das condições meteorológicas, especialmente dados de precipitação e vento, foram coletados na plataforma do Instituto Estadual do Ambiente (INEA, s.d.) para os dias em que as coletas foram realizadas. Assim, é possível relacionar a qualidade do ar e os resultados obtidos com as análises de água.

Por fim, foi realizada uma pesquisa de percepção da poluição, em termos de nível de incômodos e impactos à saúde, com a população de Volta Redonda, por meio de um questionário virtual, com amostra mínima considerando 90% de nível de confiança e 10% de margem de erro. Esse questionário foi em modelo de pesquisa de opinião pública sem identificação dos participantes, não sendo, assim, necessária aprovação do Comitê de Ética.

3 - Resultados e discussão

A primeira coleta foi realizada no dia 28 de fevereiro de 2024, período de maior ocorrência de chuvas. No Gráfico 1 são apresentados os resultados gerados para a obtenção da curva padrão para determinação do íon Fe^{2+} . O resultado apresentado é uma média de três medições de absorvância para cada ponto de concentração conhecida. Pode-se verificar uma boa linearidade entre as concentrações e a absorvância, sendo que o modelo de regressão linear (Equação 1) apresentou R^2 igual a 0,9971. O desvio padrão médio das leituras de absorvância foi de 0,003.

Gráfico 1: Curva de calibração e equação da reta - 1ª coleta.



Fonte: Autor (2024).

$$(ABS = 0,162 \times C - 0,002) \text{ Equação 1}$$

ABS = Absorvância; C = Concentração.

Assim, utilizando a Equação 1, foi possível determinar a concentração de ferro na forma de Fe^{2+} nas amostras. Além das concentrações de Fe^{2+} , observa-se na Tabela 1, as concentrações de enxofre na forma de $(SO_4)^{2-}$, bem como o pH das amostras do rio Paraíba do Sul na primeira coleta. Os resultados apresentados de leitura da absorbância e da concentração de enxofre são expressos pela média de três medições realizadas para cada bairro.

Tabela 1: Análises da água do rio Paraíba do Sul na 1ª coleta.

Bairros	ABS	mg/L	mg/L	pH
Vila	0,095±0,000	0,598±0,000	3±0,000	7,05
Aterrado	0,084 ±0,003	0,531±0,016	2±0,000	7,22
Aero	0,081±0,003	0,512±0,016	2±0,000	7,13

ABS= absorbância. **Fonte:** Autor (2024).

Pode-se notar que as concentrações de Fe^{2+} e $(SO_4)^{2-}$ e os valores de absorbância foram maiores no bairro Vila Santa Cecília, local de maior proximidade com as chaminés da siderúrgica. Já o pH apresentou o menor valor nesta localidade, seguido pelo bairro Aero. Assim como verificado para as análises da água do rio, na Tabela 2 verifica-se que a água da chuva também apresentou concentrações de Fe^{2+} e $(SO_4)^{2-}$ superiores no bairro mais próximo a siderúrgica (Vila), assim como a absorbância, que é proporcional à quantidade de ferro na amostra. Já o pH em todos os bairros, especialmente o Aero, foi abaixo de 5,6, que é característico de uma chuva ácida (STOJKOSKI e KERT, 2020). Verificou-se também que as concentrações de Fe^{2+} na água da chuva foram cerca de 3 vezes maior que no rio Paraíba do Sul (Tabelas 1 e 2), o que pode ser devido a diluição das concentrações na água do rio.

Tabela 2: Análises da água da chuva na 1ª coleta.

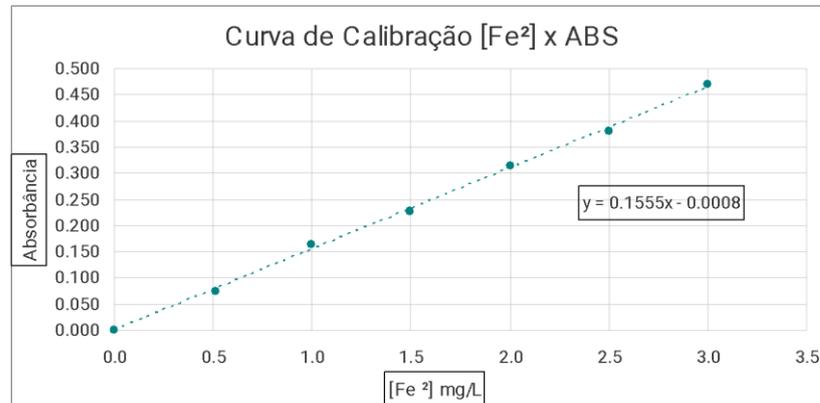
Bairros	ABS	mg/L	mg/L	pH
Vila	0,377±0,002	2,338±0,012	2±0,000	5,53
Aterrado	0,292±0,003	1,812±0,019	1±0,000	5,49
Aero	0,283±0,003	1,756±0,019	1±0,000	5,31

ABS= absorbância. **Fonte:** Autor (2024).

A segunda coleta foi realizada na madrugada do dia 10 de agosto de 2024, quando ocorreu a primeira chuva após o período da estiagem. Novamente, foi necessário preparar uma segunda curva de calibração (Gráfico 2). O resultado apresentado é uma média de três medições de absorbância para cada ponto de concentração conhecida. Pode-se verificar uma boa linearidade entre as concentrações e a absorbância por meio do modelo de regressão linear

(Equação 2), conforme verifica-se pelo valor do R^2 igual a 0,9986. O desvio padrão médio das leituras de absorvância foi de 0,003.

Gráfico 2: Curva de calibração e equação da reta - 2ª coleta.



Fonte: Autor (2024).

$$(ABS = 0,1555 \times C - 0,0008) \text{ Equação 2}$$

ABS = Absorvância; C = Concentração.

Com a nova equação obtida, deu-se prosseguimento às análises químicas da segunda coleta, conforme verificado nas Tabelas 3 e 4. Os resultados apresentados de leitura da absorvância e da concentração de enxofre são expressos pela média de três medições realizadas.

Pode-se notar que, na comparação com a primeira coleta, houve um aumento nas concentrações de Fe^{2+} em todos os bairros, evidenciando que um tempo maior sem precipitação gera um acúmulo maior dos poluentes na atmosfera. As concentrações de Fe^{2+} na água da chuva foram cerca de 4 vezes maior que no rio Paraíba do Sul, devido a questão da diluição, como verificado anteriormente no período chuvoso. Contudo, ressalta-se que, mesmo havendo a diluição, pode-se notar maiores concentrações de Fe^{2+} na água do rio no período de estiagem em comparação com o período chuvoso. Novamente, o ponto de coleta mais próximo das chaminés (Vila) apresentou maior concentração de ferro e enxofre, tanto na água do rio, quanto na água da chuva.

O pH da água da chuva na segunda coleta apresentou uma diminuição considerável, chegando a valores abaixo de 5 em dois bairros, evidenciando a forte ocorrência de chuva ácida na região. No caso do pH da água do rio, os valores nas duas coletas se mantiveram acima de 7, devido aos processos de lixiviação, levando-se em conta que em 10/08 (data da 2ª coleta) choveu 31,2 mm, enquanto que em 28/02 (data da 1ª coleta) choveu 6,8 mm; o que justifica os

maiores valores de pH para a água do rio encontrados na 2ª coleta (Tabela 3), uma vez que o maior volume de chuva resultou em maior diluição. Ressalta-se também que todos os valores de pH foram menores no bairro Vila, devido à proximidade com a siderúrgica.

Tabela 3: Análises da água do rio Paraíba do Sul na 2ª coleta.

Bairros	ABS	mg/L	mg/L	pH
Vila	0,094±0,003	0,610±0,019	3±0,000	7,19
Aterrado	0,087±0,002	0,562±0,015	2±0,000	7,27
Aero	0,079±0,002	0,511±0,013	2±0,000	7,32

ABS= absorvância. **Fonte:** Autor (2024).

Tabela 4: Análises da água da chuva na 2ª coleta.

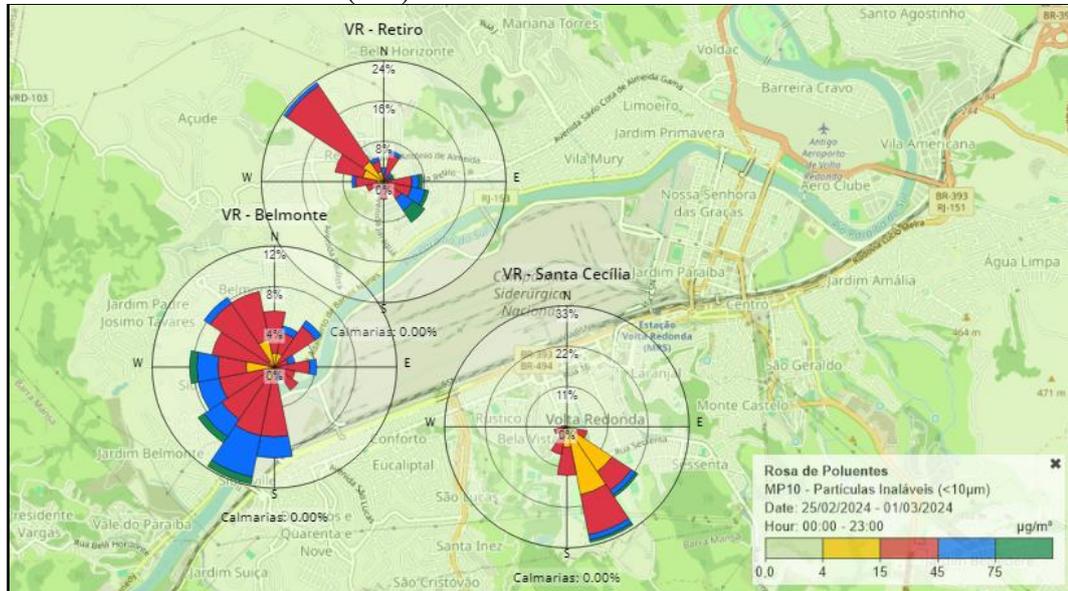
Bairros	ABS	mg/L	mg/L	pH
Vila	0,439±0,003	2,828±0,017	2±0,000	4,87
Aterrado	0,367±0,000	2,365±0,000	2±0,000	4,95
Aero	0,333±0,004	2,147±0,023	1±0,000	5,02

ABS= absorvância. **Fonte:** Autor (2024).

É importante ressaltar que a leitura da concentração do enxofre na forma de $(SO_4)^{2-}$ é realizada pelo espectrofotômetro na forma de um número inteiro, ou seja, cada valor pode estar dentro de um intervalo na casa decimal que vai de $n = 0$ até $n = 9$. Assim, devido a isso, verifica-se na Tabela 3 valores similares aos da 1ª coleta para a água do rio (Tabela 1). No caso da água da chuva, verificou-se um aumento no bairro Aterrado na segunda coleta (Tabela 4) em relação à primeira (Tabela 2). Através do Sistema Integrado de Gestão da Qualidade do Ar (SIGQAr), disponibilizado pelo INEA-RJ, foi gerado uma rosa dos poluentes (Figuras 6 e 7) para o MP_{10} , para verificar a direção predominante do vento nas semanas em que ocorreram as coletas nos locais de monitoramento.

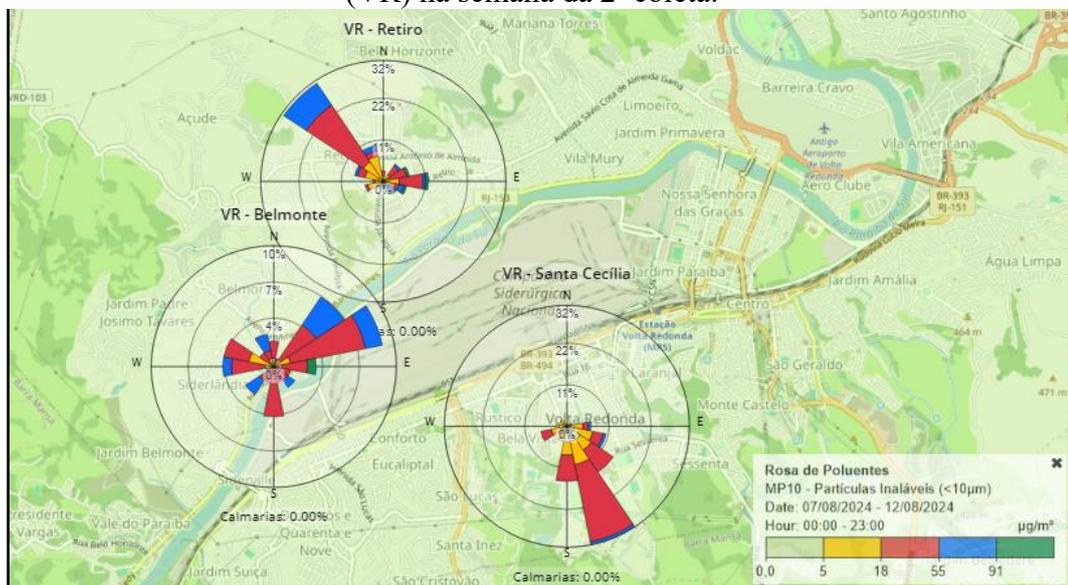
Nota-se que, na semana da 1ª coleta (25/02 - 01/03), as direções predominantes do vento foram de noroeste (24%) na estação de monitoramento do Retiro, sendo que a direção sudeste (aproximadamente 10%), onde se encontram as chaminés da siderúrgica, é onde verificam-se as maiores concentrações de MP_{10} . Isso se refletiu nas análises da água do rio (Tabela 1), onde a coleta foi próxima a estação do Retiro (Figura 2 - bairro Vila), e da chuva (Tabela 2), onde a coleta foi próxima a estação Santa Cecília (Figura 2 - bairro Vila), a qual também apresenta ventos predominantes de sudeste para noroeste; portanto, as maiores concentrações de ferro e enxofre foram observadas nestes locais mais próximos a siderúrgica.

Figura 6: Rosa dos poluentes para o MP₁₀ nas estações de monitoramento de Volta Redonda (VR) na semana da 1ª coleta.



Fonte: INEA (2024).

Figura 7: Rosa dos poluentes para o MP₁₀ nas estações de monitoramento de Volta Redonda (VR) na semana da 2ª coleta.



Fonte: INEA (2024).

Na estação Belmonte o vento apresentou maior variabilidade na semana da 1ª coleta, sendo que as direções predominantes, associadas às maiores concentrações de MP₁₀, se encontram no quadrante sul-oeste, o que facilita o arraste dos poluentes em direção ao bairro Aterrado, primeiramente, e Aero, posteriormente (Figura 2). Quando se analisa o dióxido de enxofre (SO₂) na estação Belmonte para o mesmo período (figura não mostrada), verifica-se

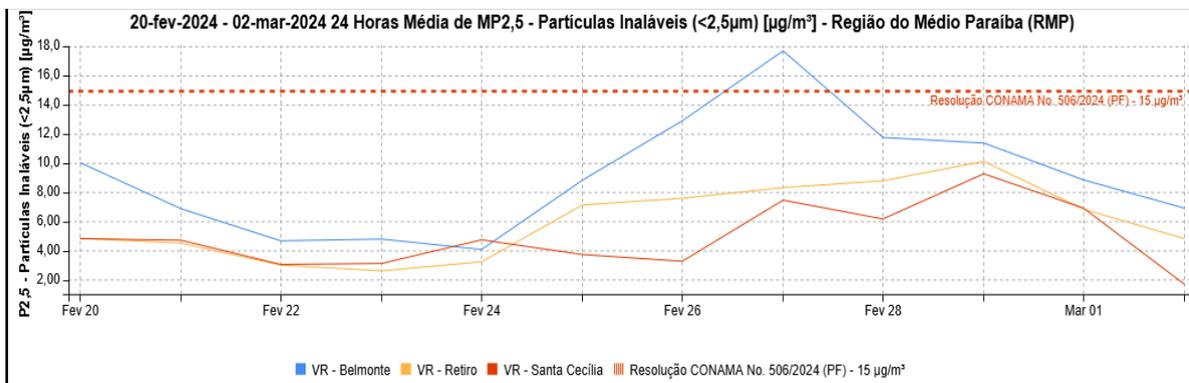
que as maiores concentrações deste poluente são provenientes da direção oeste, novamente indicando o arraste dos poluentes, o que corrobora com o fato das concentrações de Fe^{2+} e $(\text{SO}_4)^{2-}$ terem sido mais elevadas no bairro Aterrado do que no Aero (Tabelas 1 e 2).

Os mesmos padrões de ventos predominantes foram observados para o período da segunda coleta (07/08 - 12/08) nas estações do Retiro e Santa Cecília. Para a estação Belmonte foi possível observar maior predominância na direção lés-nordeste (ENE), com uma contribuição importante também na direção oeste. Destaca-se que os padrões de vento observados para o MP_{10} são similares aos verificados para o $\text{MP}_{2,5}$ e para o dióxido de enxofre (figuras não mostradas), sendo que no caso do SO_2 a estação Belmonte também apresentou uma contribuição do vento na direção oés-sudoeste (WSW) entre os dias 08 e 09/08. Isso corrobora com o fato das concentrações de Fe^{2+} e $(\text{SO}_4)^{2-}$ terem sido mais elevadas no bairro Aterrado do que no Aero (Tabelas 3 e 4), conforme também observado anteriormente na primeira coleta.

No SIGQAr também foi possível obter dados das médias dos poluentes medidos pelas estações atuantes na cidade de Volta Redonda. Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as concentrações do $\text{MP}_{2,5}$ (partículas inaláveis $< 2,5 \mu\text{m}$) nas semanas das coletas. Padrão similar foi verificado para o MP_{10} , uma vez que o $\text{MP}_{2,5}$ representa uma fração do MP_{10} . Observa-se nas figuras, que tanto para o período da primeira coleta, quanto para o da segunda, o limite estabelecido pela resolução CONAMA n° 506/2024 (Padrão Final - PF, o qual é o recomendado pela OMS), que é de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o parâmetro $\text{MP}_{2,5}$ foi ultrapassado no período imediatamente antes da ocorrência da chuva (dia 27/02 na estação Belmonte - Figura 8 e dias 08 e 09/08 nas estações Retiro e Santa Cecília - Figura 9). Após a chuva (dias 28/02 e 10/08), foi possível observar uma queda significativa na concentração destas partículas, evidenciando a importância da precipitação para a melhora na qualidade do ar, conforme também verificado por SOUZA *et al.* (2024). Ressalta-se as maiores concentrações na Figura 9, apresentando ultrapassagens em 2 estações, por ser o final do período de estiagem, quando há menor dispersão dos poluentes.

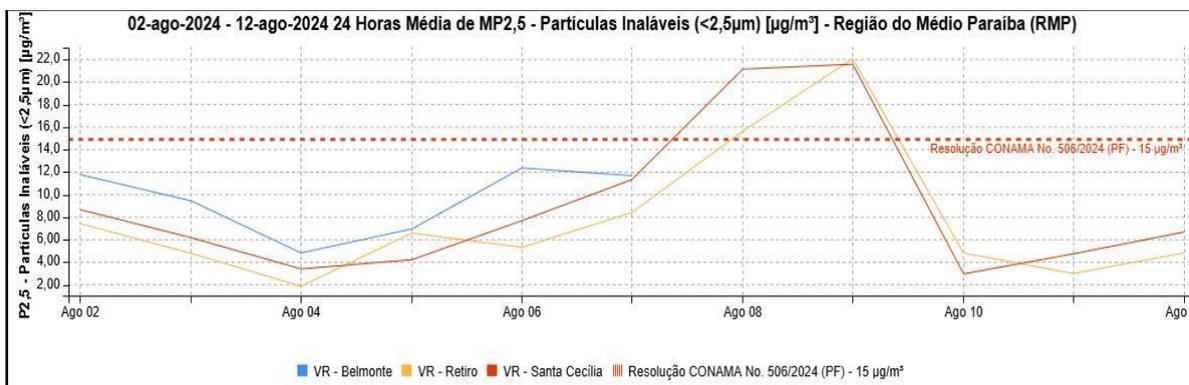
Além disso, as correlações com lag de 1 dia entre as concentrações de $\text{MP}_{2,5}$ nas estações Belmonte, Retiro e Santa Cecília e as concentrações de Fe^{2+} foram de 0,99 no dia 27/02, tanto para amostras do rio quanto da água da chuva, e de 0,95 para as amostras do rio e de 0,91 para as amostras de chuva no dia 09/08; o que demonstra a relação entre a poluição do ar e a qualidade da água, tanto no período seco, quanto no chuvoso.

Figura 8: Média da concentração dos poluentes - MP_{2,5} na semana da 1ª coleta para cada uma das estações de monitoramento analisadas.



Fonte: INEA (2024).

Figura 9: Média da concentração dos poluentes - MP_{2,5} na semana da 2ª coleta para cada uma das estações de monitoramento analisadas.



Fonte: INEA (2024).

Por fim, a pesquisa de percepção da poluição por parte da população de Volta Redonda, trouxe resultados significativos e expressivos, na qual foi evidenciada a insatisfação com a qualidade do ar. Ao todo, 71 pessoas responderam ao questionário, sendo 52,1% do sexo masculino e 47,9% do sexo feminino.

Na pesquisa foi questionado se a qualidade do ar resulta em alguma mudança no estilo de vida das pessoas e 84,5% dos participantes afirmaram que sim. As mudanças de estilo de vida citadas pelos participantes da pesquisa são apresentadas no Gráfico 3, no qual cada pessoa podia citar mais de uma opção. Verifica-se que mais de 40 participantes sentem a necessidade de manter as janelas fechadas e lavar as mãos com frequência.

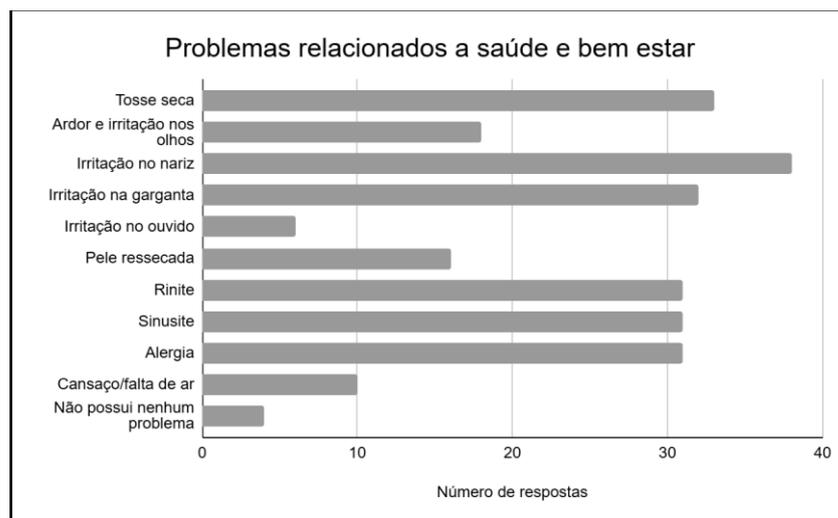
Gráfico 3: Mudanças no estilo de vida dos moradores.



Fonte: Autor (2024).

Por fim, os participantes apontaram a existência de problemas crônicos de saúde ou que possam estar relacionados à qualidade do ar na cidade. As respostas são apresentadas no Gráfico 4, no qual cada pessoa poderia citar mais de uma opção. Nota-se que mais de 30 pessoas apresentam tosse seca, irritação no nariz e garganta, rinite, sinusite e alergia.

Gráfico 4: Problemas relacionados à saúde e bem estar.



Fonte: Autor (2024).

As perguntas realizadas para os participantes e suas respostas, além das mencionadas no texto, são apresentadas no Quadro 1, sendo que estas foram baseadas no trabalho de MATOS, FREITAS e SILVA. (2023).

Quadro 1 - Demais perguntas realizadas para os participantes da pesquisa e suas respectivas respostas (opções mais escolhidas).

Perguntas	Respostas
É nativo de Volta Redonda?	Sim (50,7%).
Caso não seja nativo, qual a cidade de origem?	Barra Mansa (31,4%); Rio de Janeiro (14,3%).
Em qual bairro mora?	Aterrado (14,1%); Jardim Belvedere (14,1%).
Classifique a qualidade do ar do local onde mora: (Excelente, boa, regular, ruim, péssima)	Péssima (49,3 %); Ruim (25,4%).
Você sabe o que é monitoramento da qualidade do ar?	Sim (94,4%).
Quão importante você considera o monitoramento da qualidade do ar? (Extremamente importante, muito importante, moderado, pouco importante, sem importância, não sabe responder)	Extremamente importante (87,3%); Muito importante (8,5%).
Você conhece as ações de monitoramento da qualidade do ar realizadas no município de Volta Redonda?	Não (62%).
Caso sim, você se sente informado sobre a Qualidade do Ar no município de Volta Redonda?	Pouco informado (74,5%).
Você sabe a que órgão recorrer em casos de poluição do ar?	Não (68,8%).
Você se sente incomodado com a poluição do ar no local onde mora?	Sim (95,8%).
Caso tenha marcado “SIM” na pergunta anterior, qual seu nível de incômodo com relação a poluição do ar no local onde mora? (Extremamente incomodado, Muito incomodado, Moderado incômodo, Pouco incomodado, Não sabe responder).	Extremamente incomodado (41,2%); Muito incomodado (39,7%).

Fonte: Autor (2024).

5 - Conclusões

- Esse estudo mostrou que a chuva, de fato, tem grande importância na deposição dos poluentes presentes na camada de ar, e que quanto maior o período sem a ocorrência de precipitação, maiores são as concentrações destes. Além disso, verificou-se que a poluição do ar pode também afetar os corpos hídricos via deposição úmida, embora

exista um fator de diluição. Nesse contexto, sugere-se que em estudos futuros seja realizada a coleta da água do rio antes da ocorrência da chuva para verificar qual seria o fator de diluição associado a ocorrência da deposição úmida na água do rio.

- Os resultados obtidos através das estações de monitoramento da qualidade do ar, disponibilizados para consulta pública, comprovaram a alta concentração de poluentes atmosféricos na cidade, que inclusive ultrapassaram limites estabelecidos como seguros pela resolução vigente no Brasil.
- Com os resultados obtidos, tanto da pesquisa quanto das análises em laboratório, ficou evidente a atual problemática vivenciada na cidade de Volta Redonda/RJ. Atividades simples do dia a dia do morador são constantemente impactadas pela qualidade do ar, além de acarretar em problemas de saúde, principalmente respiratórios.

6 - Referências bibliográficas

- ABNT. (1997). *NBR 13934: Água - Determinação de ferro - Método colorimétrico da ortofenantrolina (NBR13934 de 08/1997)*. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ANA. (2017). *Base Hidrográfica Ottocodificada da Bacia do Rio Paraíba do Sul nas escalas 1:25.000/50.000*. ANA - Agência Nacional de Águas. <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/97100ae2-f173-4be7-a827-6252d3ce0718>
- Audoux, T., Laurent, B., Chevaillier, S., Féron, A., Pangui, E., Maisonneuve, F., Desboeufs, K., Triquet, S., Noyalet, G., Lauret, O., & Huet, F. (2023). *Automatic sequential rain sampling to study atmospheric particulate and dissolved wet deposition*. *Atmospheric Environment*, 295, 119561. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119561>
- Avellar, R. (2015). *Rio Paraíba do Sul – Sua Importância como Recurso Hídrico e os Impactos de sua Exploração em Relação aos Usos Múltiplos*. Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. <https://www.ceivap.org.br/downloads/TCC-Roberto-Gomes-Avellar.pdf>
- Borges, R., Soares, R. V., Gomes, R., Moreira, M., & Cassella, R. (2024). *Avaliação dos níveis de níquel no ar e na urina de moradores próximos a uma indústria e depósito de rejeitos siderúrgicos no município de Volta Redonda, RJ*. *Química Nova*. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20240001>

Brasil. (2024). *Resolução N° 506, de 5 de Julho de 2024.*

https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=827

Cavalcanti, P. (2012). *Gestão ambiental na indústria siderúrgica - Aspectos relacionados às emissões atmosféricas.* UFRJ - Escola politécnica.

<https://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10004547.pdf>

CSN. (2024). *Mineração - CSN.* CSN - Companhia Siderúrgica Nacional.

<https://www.csn.com.br/mineracao/>

Dantas, M. (2000). *Geomorfologia do estado do Rio de Janeiro.* CPRM – Serviço Geológico do Brasil. https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/17229/5/rel_proj_rj_geomorfologia.pdf

Dharaka, B. D. P., & Priyantha, N. (2023). *Atmospheric quality through analysis of dry and wet deposition at selected locations in Kandy and Gampaha districts of Sri Lanka.* *Air Quality, Atmosphere & Health.* <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01431-z>

Formigosa, C., Figueiredo, R., Oliveira, F., Santos, I. (2013). *Runoff in Oxisol under different agroecosystems in the northeast part of Pará State.* *Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p. 162-169.

https://www.researchgate.net/publication/262470669_Runoff_in_Oxisol_under_different_agroecosystems_in_the_northeast_part_of_Para_State.

G1. (2023). *Moradores de Volta Redonda reclamam de poluição da CSN: 'Situação está insustentável'.* <https://g1.globo.com/rj/sul-do-rio-costa-verde/noticia/2023/06/12/moradores-de-volta-redonda-reclamam-de-poluicao-da-csn-situacao-esta-insustentavel.ghtml>

<https://g1.globo.com/rj/sul-do-rio-costa-verde/noticia/2023/06/12/moradores-de-volta-redonda-reclamam-de-poluicao-da-csn-situacao-esta-insustentavel.ghtml>

IAS. (2022). *O saneamento em Volta Redonda | RJ | municípios e saneamento | instituto água e saneamento.* IAS - Instituto Água e Saneamento.

<https://www.aguasaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/rj/volta-redonda>

IBGE. (2008). *Potencial de poluição industrial do ar no estado do Rio concentra-se em 4 municípios.* IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/13486-asi-potencial-de-poluicao-industrial-do-ar-no-estado-do-rio-concentra-se-em-4-municipios#:~:text=Rio%20de%20Janeiro%2C%20Volta%20Redonda%20e%20Cantag>

[municipios#:~:text=Rio%20de%20Janeiro%2C%20Volta%20Redonda%20e%20Cantag](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/13486-asi-potencial-de-poluicao-industrial-do-ar-no-estado-do-rio-concentra-se-em-4-municipios#:~:text=Rio%20de%20Janeiro%2C%20Volta%20Redonda%20e%20Cantag)

lo%20respondem%2C%20juntos%2C,contribui%C3%A7%C3%A3o%20para%20esse
20potencial%20poluidor

- IBGE. (2022a). *IBGE | Cidades@ | Rio de Janeiro | Volta Redonda | Panorama*.
<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/volta-redonda/panorama>
- IBGE. (2022b). *Malha Municipal | IBGE*. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>
- IEMA. (2014). *1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil*. IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente. <https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2014/01/1-diagnostico-da-rede-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-no-brasil.pdf>
- INEA. (s.d.). *SIGQAr - Sistema Integrado de Gestão da Qualidade do Ar - |Analíticos|*. INEA - Instituto Estadual do Ambiente. <https://ei.weblakes.com/INEAPublico/NavPage/Index/Analytics?aGroupId=NPSEARCH>
- Lins, M. E. A., Paiva, S. C., Silva, L. R. A., Barbosa, A. C. A., Santos, A. K. C., & Ferreira, J. d. S. (2020). *Análise da qualidade da água de chuva no bairro da Boa Vista – estudo de caso*. *Brazilian Journal of Development*, 6(1), 2257–2264. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-164>
- Matos, C. A. d., Freitas, A. C. V., & Silva, A. M. L. (2023). *Avaliação do nível de incômodo da população de Itabira/MG à poluição atmosférica*. *Research, Society and Development*, 12(2), Artigo e7312239494. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i2.39494>
- Oduber, F., Calvo, A. I., Castro, A., Blanco-Alegre, C., Alves, C., Barata, J., Nunes, T., Lucarelli, F., Nava, S., Calzolari, G., Cerqueira, M., Martín-Villacorta, J., Esteves, V., & Fraile, R. (2020). *Chemical composition of rainwater under two events of aerosol transport: A Saharan dust outbreak and wildfires*. *Science of the Total Environment*, 734, 139202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139202>
- Oliveira, J. G. I. d., Paiva, R. F. d. P. d. S., Reis, M. M. d., & Góis, G. D. (2020). *Poluição do ar e internações hospitalares por doenças respiratórias em volta redonda (rj)*. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 55(1), 72–88. <https://doi.org/10.5327/z2176-947820200642>
- OMS. (2021). *Novas diretrizes da OMS sobre qualidade do ar reduzem valores seguros para poluição*. OMS - Organização Mundial da Saúde. <https://brasil.un.org/pt-br/145721-novas-diretrizes-da-oms-sobre-qualidade-do-ar-reduzem-valores-seguros-para-poluição>

- SAAE-VR. (s.d.). *Tratamento de água: Volta Redonda*. SAAE-VR - Sistema de abastecimento de água e esgoto. http://www.saaevr.com.br/tratamento_de_agua.asp
- Santos, H., Duarte, S. (2021). *Chuvas intensas em Volta Redonda*. UNESP - Irriga, Botucatu, v. 26, n. 4, p. 801-813. <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4315/3209>
- Santos, J., Reis, N., Galvão, E. (2022). *Material particulado na atmosfera urbana e suas interações com a saúde humana*. Goiânia, GO: Alta Performance, 1 ed. https://nqualiar.ufes.br/sites/nqualiar.ufes.br/files/field/anexo/material_particulado_na_atmosfera_urbana_e-book_0.pdf
- Sarikulov, M. (2024). *On the negative impact of acid rain on public health*. Western European Journal of Modern Experiments and Scientific Methods, v2. <https://westerneuropianstudies.com/index.php/1/article/view/1453/981>
- SEEG. (2023). *Panorama das emissões e remoções de gases de efeito estufa no Brasil*. SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima. <https://seeg.eco.br/infograficos/>
- Serpa, F. S., Reisen, V. A., Zandonade, E., Aranda, H. C., & Solé, D. (2022). *Air pollution and respiratory health*. Arquivos de Asmas Alergia e Imunologia, 6(1). <https://doi.org/10.5935/2526-5393.20220008>
- Silva, K. K. d., Duarte, F. T., Rodrigues Matias, J. N., Morais Medeiros Dias, S. A., Duarte, E. d. S. F., Cunha da Silva Soares, C. G., Hoelzemann, J. J., & de Oliveira Galvão, M. F. (2019). *Physico-chemical properties and genotoxic effects of air particulate matter collected from a complex of ceramic industries*. Atmospheric Pollution Research, 10(2), 597–607. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.11.001>
- Siqueira, P., Fontana, N., Monteiro, R. (2024). *Estado do Rio de Janeiro e qualidade do ar: evolução da regulação e dos parâmetros monitorados*. XV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Belém/PA. <http://dx.doi.org/10.55449/congea.15.24.IV-005>
- Souza, C. M. d., Alves, L. D., Almeida, J. C. A. d., Silva, G. N. d., Rosas, D. F., Nogueira, L. H. R., Carvalho, F. S., Lemos, J. d. S., Ohnuma Junior, A. A., & Bila, D. M. (2024). *Influência da sazonalidade na concentração de poluentes em um sistema de aproveitamento de água de chuva*. Caderno Pedagógico, 21(6), Artigo e4825. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n6-071>

- Stojkoski, V., & Kert, M. (2020). *Design of ph responsive textile as a sensor material for acid rain*. *Polymers*, 12(10), 2251. <https://doi.org/10.3390/polym12102251>
- Vasques, T., Lisboa, H. (2016). *Monitoramento da qualidade da água da chuva no campus da UFSC em Florianópolis, e análise da trajetória de partículas com modelo Hysplit*. ABES XVII SILUBESA. https://abes-dn.org.br/anaisletronicos/32_Download/TrabalhosCompletoPDF/X-018.pdf
- Zeng, J., Han, G., Wu, Q., Peng, M., Ge, X., Mao, S., Wang, Z.-J., & Ma, Q. (2024). *Chemical evolution of rainfall in China's first eco-civilization demonstration city: Implication for the provenance identification of pollutants and rainwater acid neutralization*. *Science of The Total Environment*, 910, 168567. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168567>
- Zhang, L., Wang, J., Wang, S., Wang, C., Yang, F., & Li, T. (2023). *Chemical characteristics of long-term acid rain and its impact on lake water chemistry: A case study in Southwest China*. *Journal of Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.03.028>

Publisher: Universidade Federal de Jataí. Instituto de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFJ. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores: João Victor de Oliveira Peixoto Leal: coleta e análise dos dados, organização dos dados e tabelas, escrita e discussão; Ana Carolina Vasques Freitas: orientação, análise formal de dados, validação e revisão da escrita e discussão; Edison Aparecido Laurindo: orientação, validação e revisão da escrita e discussão. Declaramos ainda ciência das Diretrizes Gerais da Geoambiente On-line.

Financiamento: À Universidade Federal de Itajubá (Unifei) Campus Itabira pelo apoio para o desenvolvimento da pesquisa.

Conflito de interesse: Os autores declaram que não possuem interesses financeiros ou não financeiros relevantes relacionados a este trabalho.