

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Evaluación de la composición química atmosférica del estado de Rio de Janeiro, Brasil

Una aplicación de la quimiometría



CONAMA 2024

EVALUACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA ATMOSFÉRICA DEL ESTADO DE RIO DE JANEIRO, BRASIL

Autor Principal: Hellen Gonçalves Vieira (Universidad Estatal del Norte Fluminense)

Otros autores: Luis Fhernando Mendonça da Silva (Pontificia Universidad Católica del Rio de Janeiro); Rodrigo Stellet Ferreira (Universidad Estatal del Norte Fluminense); Marcos Felipe de S. Pedreira (Pontificia Universidad Católica del Rio de Janeiro); Cibele Maria Stivanin de Almeida (Universidad Estatal del Norte Fluminense); Vanessa A. dos Anjos (Universidad Federal del Paraná); Ricardo Henrique M. Godoi (Universidad Federal del Paraná); Tatiana Dillenburg Saint'Pierre (Pontificia Universidad Católica del Rio de Janeiro); Luiz Francisco P.G. Maia (Universidad Federal del Rio de Janeiro); Adriana Gioda (Pontificia Universidad Católica del Rio de Janeiro); Maria Cristina Canela (Universidad Estatal del Norte Fluminense).

ÍNDICE

- Título
- Resumen
- Introducción
- Metodología
- Resultados y Discusión
- Conclusión
- Bibliografía

RESUMEN

La presencia de iones y metales inorgánicos en la atmósfera, ya sea asociados al material particulado (PM) o en estado libre, ha sido un importante indicador del transporte natural y de la presencia de contaminantes. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la composición inorgánica de la deposición atmosférica y de partículas finas (PM_{2,5}) en ciudades con diferentes niveles de urbanización en el estado de Rio de Janeiro, Brasil, con el fin de identificar la influencia antrópica y sus impactos regionales. Se analizaron especies iónicas (NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ y PO₄³⁻) y metales inorgánicos (Al, Zn, Ni y Pb). Los datos obtenidos se utilizaron para construir modelos quimiométricos mediante Análisis de Componentes Principales (PCA). Los principales resultados destacan la influencia de fuentes crustales en la ciudad de Campos dos Goytacazes, de fuentes naturales derivadas de la vegetación en el municipio de Guapimirim y de fuentes vehiculares en la ciudad de Rio de Janeiro, atribuibles a su alta urbanización. Este trabajo contribuye a comprender el impacto regional de los contaminantes presentes en la atmósfera y sus posibles fuentes de emisión.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es responsable de aproximadamente 7 millones de muertes al año en todo el mundo, incluidas 51,000 muertes registradas en Brasil. Este impacto es resultado de que el 99 % de la población global está expuesta a una atmósfera con altos niveles de contaminantes (OPAS, 2018; WHO, 2021). Estos contaminantes tienen orígenes variados, pudiendo ser emitidos por fuentes naturales, como erupciones volcánicas, formación de aerosoles marinos e intemperismo crustal, o por fuentes antrópicas relacionadas con actividades humanas, como la minería, actividades industriales y emisiones de vehículos. Actualmente, la producción de energía se destaca como una de las principales fuentes antrópicas de contaminación atmosférica, contribuyendo significativamente a la emisión de material particulado (*Particulate Matter* - PM) y gases como dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Este proceso ocurre predominantemente por la quema de combustibles fósiles

(carbón, petróleo y gas natural), generándose tanto por industrias como por vehículos (Samayamanthula et al., 2020).

La composición química de iones y metales inorgánicos en la atmósfera se utiliza ampliamente como indicador del transporte de partículas y para la identificación de fuentes de contaminantes atmosféricos. El material particulado (PM) es una mezcla compleja de partículas sólidas y pequeñas gotas líquidas presentes en el aire, y constituye un parámetro esencial en estudios atmosféricos debido a su variada composición. Está formado principalmente por iones inorgánicos (entre el 30 % y el 50 %), carbono negro (5 % a 25 %) y metales (1 % a 5 %) (Correa et al., 2023; Seares et al., 2021; Meng et al., 2019; Santa-Helena et al., 2021; Yamasoe et al., 2000). Además, la deposición atmosférica, tanto húmeda como seca, se monitorea ampliamente, ya que es el principal proceso de eliminación de gases y partículas (solubles e insolubles) de la atmósfera (Oliveira et al., 2012; Salve et al., 2008). Así, el estudio de estos procesos resulta fundamental para comprender la contaminación atmosférica en una región, así como los posibles riesgos para la salud de la población expuesta.

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la composición química de la atmósfera en distintas localidades del estado de Rio de Janeiro (RJ), Brasil. La investigación se realizó en tres ciudades con niveles de urbanización distintos: Rio de Janeiro (capital), Guapimirim y Campos dos Goytacazes. En estas ciudades se monitorearon especies iónicas (NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} y PO_4^{3-}) y metales inorgánicos (Al, Zn, Ni y Pb) presentes, tanto en el material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$, con un diámetro inferior a $2,5 \mu\text{m}$) como en la deposición atmosférica. Los datos obtenidos fueron estandarizados y utilizados para construir modelos quimiométricos, lo que permitió una interpretación detallada de los resultados.

METODOLOGÍA

Área de estudio

Las áreas de estudio fueron: 1) campus de la Universidad Estatal del Norte Fluminense – UENF (latitud sur de $21^\circ 45' 39''$ y longitud oeste de $41^\circ 17' 30''$) en el municipio de Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil; 2) campus de la PUC-Rio, situado en el barrio de Gávea (latitud sur de $22^\circ 58' 60''$ y longitud oeste de $43^\circ 13' 60''$) en la ciudad de Rio de Janeiro – RJ, Brasil; y 3) PARNASO, ubicado en el municipio de Guapimirim – RJ, Brasil (latitud sur de $22^\circ 29' 35''$ y longitud oeste de $43^\circ 04' 24''$), región de sierra. Estos lugares están representados en la Figura 1.

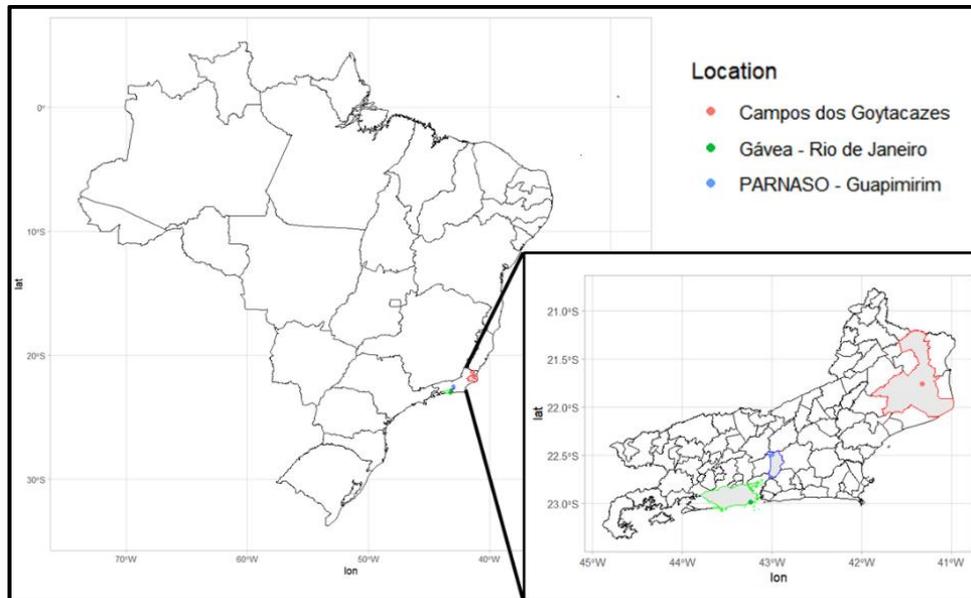


Figura 1. Lugares de muestreo.

Campos dos Goytacazes, un municipio en la región Norte Fluminense (RJ), es conocido por sus actividades agrícolas, especialmente el cultivo de caña de azúcar, donde es común la quema previa a la cosecha manual. En contraste, la ciudad de Rio de Janeiro presenta un alto nivel de urbanización y un intenso flujo vehicular. El punto de muestreo, ubicado en el barrio de Gávea, se encuentra próximo al mar y a áreas verdes, como la Piedra da Gávea y el Peñasco Dois Irmãos. Por último, Guapimirim, municipio de la región metropolitana de RJ, alberga áreas de preservación ambiental, incluido el Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), donde se realizaron las muestras. Esta zona destaca por la densa vegetación de la Mata Atlántica y el tráfico vehicular debido a su cercanía con una carretera (Ferreira et al., 2021; Mateus et al., 2020; Santa-Helena et al., 2021; Silva et al., 2024; Vieira et al., 2022).

Muestreo

Deposición atmosférica.

Las muestras de deposición atmosférica se recolectaron mensualmente entre los años 2022 y 2023, utilizando frascos de polietileno (capacidad de 2 L) conectados a un embudo de polietileno de alta densidad (diámetro = 11,3 cm) con malla incorporada. Antes de la instalación de cada recolector, se realizaron blancos de campo utilizando 200 mL de agua ultrapura en el embudo y recolectando en el frasco recolector.

Material Particulado.

Las muestras de material particulado fino ($PM_{2,5}$) se recolectaron mensualmente utilizando un muestreador activo de gran volumen (HiVol AGV AS $PM_{2,5}$, SOMAR). Este muestreador estaba equipado con filtros de fibra de vidrio (WhatmanTM, Maidstone, Reino Unido) previamente calcinados en horno de mufla durante 24 horas a 300 °C. Los muestreos se llevaron a cabo

durante 24 h, comenzando a las 12:00 h y totalizando un volumen muestreado de 1627,2 m³. Tras la recolección, los filtros se almacenaron en desecadores durante 24 horas hasta el momento del análisis gravimétrico y se mantuvieron en nevera hasta su extracción.

Tratamiento de las muestras

Deposición atmosférica.

Las muestras fueron llevadas al laboratorio, donde se registraron sus volúmenes y se tomaron alícuotas de 35 mL para medir el pH. Esta medida se realizó con la ayuda de un pHmetro (DM-23-DC, Digimed, Brasil) previamente calibrado con soluciones tampón de pH 4,01 (DM-S1B, Digimed, Brasil) y 6,86 (DM-S1A, Digimed, Brasil), a una temperatura de aproximadamente 25 °C. El volumen restante de las muestras fue filtrado en filtros de acetato de celulosa (0,22 µm) para el análisis de las especies iónicas y metales inorgánicos. El primer filtrado, destinado al análisis de las especies iónicas por cromatografía de iones, se reservó a -20 °C. El segundo filtrado fue acidificado con 1 % v/v HNO₃ bidestilado y se reservó a 4 °C para el análisis de metales inorgánicos.

Material Particulado.

Inicialmente, se cortaron dos tiras de cada muestra, con un área de 51,61 cm² cada una; la primera tira fue destinada a la extracción acuosa y la segunda a la extracción ácida. Para la extracción acuosa, el filtro se transfirió a un tubo Falcon de 50 mL, donde se añadieron 20 mL de agua ultrapura. A continuación, las muestras se sometieron a agitación mecánica en vórtex y luego a centrifugación durante 4 min a 2000 rpm. Posteriormente, las soluciones se filtraron a través de filtros de acetato de celulosa de 0,22 µm y se almacenaron a -20 °C. Para la extracción ácida, el filtro se colocó en un tubo de borosilicato y se le añadió una mezcla ácida de HNO₃ y HClO₄ (3:7 v/v), de acuerdo con Seares et al. (2021). A continuación, se calentaron en un bloque de digestión a 175 °C durante 2 horas y, finalmente, se dejaron enfriar a temperatura ambiente, se filtraron y se almacenaron en tubos Falcon de 50 mL a 4 °C.

Análisis Instrumental

El análisis de especies iónicas se llevó a cabo utilizando la técnica cromatografía de iones (DIONEX, ICS5000) para el análisis de aniones y cationes. Las condiciones del cromatógrafo de iones se ilustran en la Cuadro 1. Las especies iónicas analizadas en este trabajo fueron amonio, sodio, potasio, magnesio, calcio, nitrato, sulfato y fosfato.

Cuadro 1. Parámetros instrumentales del cromatógrafo de iones

Parámetros	Cationes	Aniones
Volumen de inyección	250 µL	100 µL
Fase móvil	CH ₃ SO ₂ OH (18,0 mmol L ⁻¹)	KOH (3,0 mmol L ⁻¹)
Precolumna	Dionex IonPac CG12A	Dionex IonPac AS19
Columna	Dionex IonPac CS12A	Dionex IonPac AG19

El análisis de los metales inorgánicos se llevó a cabo utilizando la técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) monitorizando los isótopos ^{27}Al , ^{60}Ni , ^{66}Zn y ^{208}Pb . Todas las mediciones se realizaron por triplicado y las áreas de intensidad de pico se integraron para determinar la concentración de cada elemento utilizando sus respectivas curvas analíticas.

Por último, en las muestras de $\text{PM}_{2,5}$ se determinó la presencia de carbono negro (BC). Los análisis de este contaminante se realizaron utilizando un transmisor óptico portátil (SootScan, OT-21, Berkeley, Florida, EUA) con un haz infrarrojo de longitud de onda de 880 nm aplicado sobre el filtro de fibra de vidrio de la muestra (De La Cruz et al., 2024).

Análisis de Componentes Principales

Para reducir la dimensionalidad de los datos generados y facilitar la interpretación de los resultados, se utilizó el Análisis de Componentes Principales (PCA) con el objetivo de identificar las diferencias regionales y las posibles fuentes de emisión de los contaminantes químicos. Para ello, las concentraciones obtenidas fueron preprocesadas utilizando el autoescalado, debido a la gran variabilidad de los datos. Finalmente, se generaron gráficos de *scores* y *loadings* utilizando MATLAB R2018a.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Deposición atmosférica

En el modelo construido para las muestras de deposición atmosférica, se utilizaron seis componentes principales, según lo indicado por el método de *Cross Validation Classification Error* (CVCE), resultando en un 93,70 % de la varianza total explicada. Para identificar las principales diferencias entre las ciudades evaluadas en este estudio, el gráfico de *scores* PC1 versus PC2 (51,80 % de la varianza explicada) demuestra una tendencia de separación regional de las muestras, como se ilustra en la Figura 2.

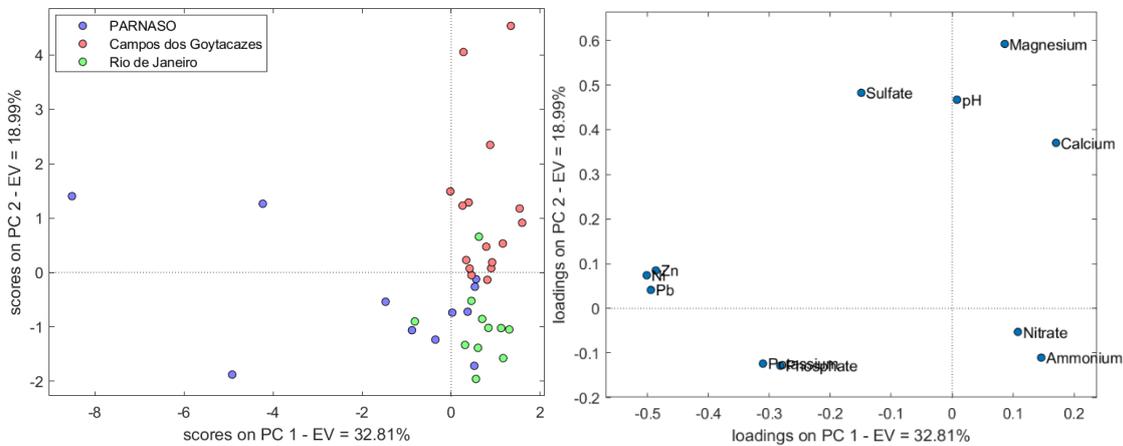


Figura 2. Gráfico de scores y loadings de las muestras de deposición atmosférica.

En el gráfico anterior, se observa una tendencia de separación de las muestras de Campos dos Goytacazes a lo largo del eje PC2. Las variables más significativas para esta distinción en el eje PC2 son magnesio, sulfato y calcio, como se muestra en la Figura 2, que presenta el gráfico de cargas (*loadings*). Estos iones provienen principalmente de fuentes crustales, como el polvo del suelo y las actividades de construcción. Además, se destaca que las concentraciones más altas de calcio se registran entre septiembre y diciembre, periodo en el cual hay una mayor incidencia de vientos en la región (Braga et al., 2021).

Por otro lado, las muestras recolectadas en el Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO) en Guapimirim mostraron una marcada separación en el eje PC1, con una mayor contribución de las variables Ni, Pb, Zn, potasio y fosfato. El catión potasio proviene principalmente de la quema de biomasa y podría estar relacionado con las características geológicas de la región (Zeng & Han, 2020). En cuanto al anión fosfato, se asocia con fuentes naturales de emisión, como esporas, polen y fragmentos de materia vegetal (Bigio & Angert, 2018), reflejando la influencia de las características locales. Por el contrario, los elementos Pb y Zn son indicadores de contaminación antrópica, generalmente asociados a emisiones vehiculares e industriales. El Ni, por su parte, es un elemento ya reportado en combustibles como gasolina y diésel (Seares et al., 2021). Las concentraciones de estos elementos fueron más elevadas en diciembre, enero y febrero, un periodo de vacaciones en el que aumenta el flujo de vehículos en las carreteras. Cabe destacar que el Parque Nacional da Serra dos Órgãos, donde se encuentra el famoso pico “Dedo de Deus”, es un destino turístico muy visitado en esta época del año.

Por último, en el cuarto cuadrante (inferior derecho) del gráfico, se encuentran las muestras de la ciudad de Rio de Janeiro, donde los iones nitrato y amonio son las principales variables. Los iones NO_x están fuertemente asociados a emisiones antrópicas provenientes de fuentes móviles, como el escape y desgaste de automóviles. Así, el elevado nivel de urbanización y el intenso tráfico en esta región contribuyen a las características específicas de la composición química atmosférica (Cerqueira et al., 2014).

Material Particulado

En el modelo construido para las muestras de PM_{2,5} se utilizaron seis componentes principales, que explican el 82,30 % de la varianza total. El modelo PC1 versus PC3 (42,65 % de la varianza explicada), ilustrado en la Figura 3, fue el que presentó una mejor separación de las muestras por región.

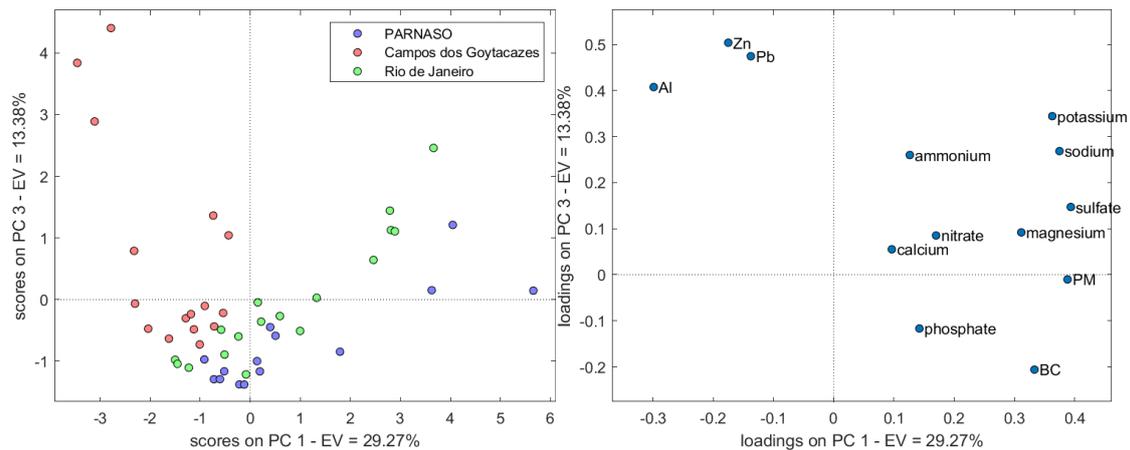


Figura 3. Gráfico de scores y loadings de las muestras de material particulado.

La distribución de las muestras a lo largo de la PC1 revela una tendencia de separación de las muestras de Campos dos Goytacazes, principalmente debido a las mayores concentraciones de Al observadas (Figura 3), que pueden tener su origen en el suelo local. Esta región posee un suelo derivado de granitos y gneises, siendo este último caracterizado por la presencia de silicio y aluminio (Abbasi et al., 2020; Costa et al., 2008). Esta tendencia es consistente con las observaciones realizadas en las muestras de deposición atmosférica, donde las fuentes crustales ejercen una influencia significativa en las características químicas de la región.

Por otro lado, las muestras del PARNASO presentaron como principales variables las concentraciones de fosfato, material particulado (PM) y carbono negro (BC) (Andrade et al., 2012; de Miranda et al., 2012). El fosfato, como se discutió anteriormente, es característico de emisiones de fuentes naturales. Sin embargo, en Brasil, la concentración de PM_{2,5} está ampliamente asociada a las emisiones vehiculares, siendo el BC un contaminante frecuentemente utilizado como marcador de vehículos pesados. Estos resultados refuerzan la influencia de la carretera en la contaminación atmosférica de esta región.

Las muestras recolectadas en Rio de Janeiro, destacadas en verde entre las muestras de Campos dos Goytacazes y PARNASO, se diferencian debido a las mayores concentraciones de los iones nitrato y sodio, variables con fuerte influencia en los ejes PC1 y PC3. En una región urbanizada como esta, se observa una notable contribución antrópica asociada a la emisión vehicular. No obstante, es importante señalar también la presencia de fuentes naturales de sodio, relacionadas con la formación de aerosoles marinos. El punto de muestreo, ubicado en el barrio de Gávea, en la ciudad de Rio de Janeiro, está cercano a la Playa de Leblon (aproximadamente a 2 km), lo que evidencia la causa de esta influencia en las muestras de ese lugar.

Por último, de manera general, se observa que las muestras de deposición atmosférica y de material particulado fino presentan características complementarias para cada región estudiada. Cabe destacar que las muestras de las ciudades de Guapimirim y Rio de Janeiro, en ambos gráficos de *scores* (deposición atmosférica y material particulado), presentan una mayor proximidad entre sí. Esto se debe, no solo a la proximidad geográfica de estos puntos de muestreo, sino también a la similitud en las fuentes de emisión, ya sea por la vegetación local o por los vehículos.

CONCLUSIÓN

El presente trabajo destaca el uso de la quimiometría asociada al análisis de especies químicas para identificar las características atmosféricas regionales y sus posibles fuentes de emisión. Se subraya que la atmósfera de la ciudad de Campos dos Goytacazes está influenciada por fuentes crustales, y la ocurrencia de vientos en la región y el manejo de la tierra para cultivos puede contribuir al transporte o resuspensión de estas especies químicas. Por otro lado, el Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), ubicado en el municipio de Guapimirim, presenta influencias de la vegetación local, así como contaminación derivada del tráfico de vehículos en la carretera cercana al punto de muestreo. Además, como se pudo observar en el PCA, las muestras de PARNASO y Rio de Janeiro no presentan una buena separación. Esto ocurre porque, a pesar de que PARNASO es una región con vegetación, la presencia de la carretera impacta directamente sus características. Finalmente, el elevado nivel de urbanización de la ciudad de Rio de Janeiro se refleja en las altas concentraciones de nitrato. La identificación de las posibles fuentes de emisión y las principales características de cada región permite comprender los riesgos para la salud asociados a cada contaminante, contribuyendo a la implementación de medidas preventivas.

BIBLIOGRAFIA

- Abbasi, S. A., Rafique, M., Mir, A. A., Kearfott, K. J., Ud-Din Khan, S., Ud-Din Khan, S., Khan, T. M. y Iqbal, J. (2020). Quantification of elemental composition of Granite Gneiss collected from Neelum Valley using calibration free laser-induced breakdown and energy-dispersive X-ray spectroscopy. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13(1), 362–372. <https://doi.org/10.1080/16878507.2020.1739801>
- Bigio, L. y Angert, A. (2018). Isotopic signature of atmospheric phosphate in airborne tree pollen. *Atmospheric Environment*, 194(September), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.020>
- Braga, R. A. H. W., Santos, E. B. y Barros, M. F. de. (2021). Validação de dados de vento da reanálise ERA5-LAND para estimativa de potencial eólico no Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Energia*, 27(4), 142–166. <https://doi.org/10.47168/rbe.v27i4.592>
- Correa, M. A., Franco, S. A., Gómez, L. M., Aguiar, D. y Colorado, H. A. (2023). Characterization Methods of Ions and Metals in Particulate Matter Pollutants on PM2.5 and PM10 Samples from Several Emission Sources. *Sustainability (Switzerland)*, 15(5).

<https://doi.org/10.3390/su15054402>

Costa, A. N., Polivanov, H. y Alves, M. D. G. (2008). Mapeamento geológico-geotécnico preliminar, utilizando geoprocessamento, no município de Campos dos Goytacazes, Estado do Rio de Janeiro. *Anuário Do Instituto de Geociências*, 31(1), 50–64. https://doi.org/10.11137/2008_1_50-64

de Andrade, M. F., de Miranda, R. M., Fornaro, A., Kerr, A., Oyama, B., de Andre, P. A. y Saldiva, P. (2012). Vehicle emissions and PM 2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 5(1), 79–88. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0104-5>

De La Cruz, A. H., da Silva, L. F. M., Silva, F. L. M., dos Anjos, V. A., Godoi, R. H. M. y Gioda, A. (2024). Black Carbon and Particulate Matter Concentrations: Air Pollution Levels in Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 35(8), 1–12. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20240029>

de Miranda, R. M., de Andrade, M. F., Fornaro, A., Astolfo, R., de Andre, P. A. y Saldiva, P. (2012). Urban air pollution: A representative survey of PM 2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 5(1), 63–77. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0124-1>

Facchini Cerqueira, M. R., Pinto, M. F., Derossi, I. N., Esteves, W. T., Santos, M. D. R., Matos, M. A. C., Lowinsohn, D. y Matos, R. C. (2014). Chemical characteristics of rainwater at a southeastern site of Brazil. *Atmospheric Pollution Research*, 5(2), 253–261. <https://doi.org/10.5094/APR.2014.031>

Ferreira, R., Nunes, C., Souza, M. y Canela, M. (2021). Multivariate Optimization of Extraction Variables of PAH in Particulate Matter (PM10) in Indoor/Outdoor Air at Campos dos Goytacazes, Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 59(2), 265–270. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20200216>

Mateus, V. L., Gioda, A., Marinho, H. R., Rocha, R. C. C., Valles, T. V., I. Prohmann, A. C., dos Santos, L. C., Oliveira, T. B., Melo, F. M., Saint’Pierre, T. D. y Maia, L. F. P.G. (2020). Assessment of ambient aerosol sources in two important Atlantic Rain Forest hotspots in the surroundings of a megacity. *Urban Forestry & Urban Greening*, 56(126858). <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126858>

Meng, X., Wu, Y., Pan, Z., Wang, H., Yin, G. y Zhao, H. (2019). Seasonal characteristics and particle-size distributions of particulate air pollutants in Urumqi. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3), 396. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030396>

Oliveira, P. L., Figueiredo, B. R. y Cardoso, A. A. (2012). Rainwater major and trace element contents in Southeastern Brazil: an assessment of a sugar cane region in dry and wet period. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 23(12), 2258–2265. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532012001200015>

- OPAS – Organização Pan-Americana da Saúde. (2018). *Não polua o meu futuro! O impacto do ambiente na saúde das crianças* [Archivo PDF]. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/49123>
- Salve, P. R., Maurya, A., Wate, S. R. y Devotta, S. (2008). Chemical composition of major ions in rainwater. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 80(3), 242–246. <https://doi.org/10.1007/s00128-007-9353-x>
- Samayamanthula, D. R., Sabarathinam, C. y Alayyadhi, N. A. (2021). Trace Elements and Their Variation with pH in Rain Water in Arid Environment. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 80(2), 331–349. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00787-y>
- Santa-Helena, E., Calderon, E. R. D., Gioda, A., Saint Pierre, T. D., Gonçalves, C. A. N., de Castro, A. L., Jiménez-Vélez, B. y Gioda, C. R. (2021). From air to heart: Particle pollution (PM_{2.5}) and induced injury on cardioblast cells. *Atmospheric Pollution Research*, 12(4), 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.03.001>
- Seares, L. F. A., de Oliveira Souza, M., Lionel-Mateus, V. y De Almeida, C. M. S. (2021). Optimization of operational ICP OES parameters and application to PM₁₀ monitoring associated to sugarcane burning. *Microchemical Journal*, 163(105917). <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105917>
- Silva, L. F. M. da, Felix, C. S. A., Nascimento, M. M., Andrade, J. B. de, Canela, M. C., Almeida, C. M. S. de, Silveira, C. S., Carreira, R. da S. y Gioda, A. (2024). Characterization of mercury in atmospheric particulate matter in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Science: Atmospheres*, 4(8), 872–878. <https://doi.org/10.1039/d4ea00044g>
- Vieira, H., Figueiredo, A. P., Souza, M. y Canela, M. C. (2022). AVALIAÇÃO DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS AROMÁTICOS NA ATMOSFERA EM CAMPOS DOS GOYTACAZES E ITAPERUNA APLICANDO A ANÁLISE MULTIVARIADA DE DADOS. *Química Nova*, 46(1), 29–38. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170952>
- WHO – World Health Organization (22 de Septiembre de 2021). *Air pollution*. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- Yamasoe, M. A., Artaxo, P., Miguel, A. H. y Allen, A. G. (2000). Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the Amazon Basin: Water-soluble species and trace elements. *Atmospheric Environment*, 34(10), 1641–1653. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00329-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00329-5)
- Zeng, J. y Han, G. (2020). Rainwater chemistry reveals air pollution in a karst forest: Temporal variations, source apportionment, and implications for the forest. *Atmosphere*, 11(12), 1–18. <https://doi.org/10.3390/atmos1112131>