

V.21 nº44 (2025)

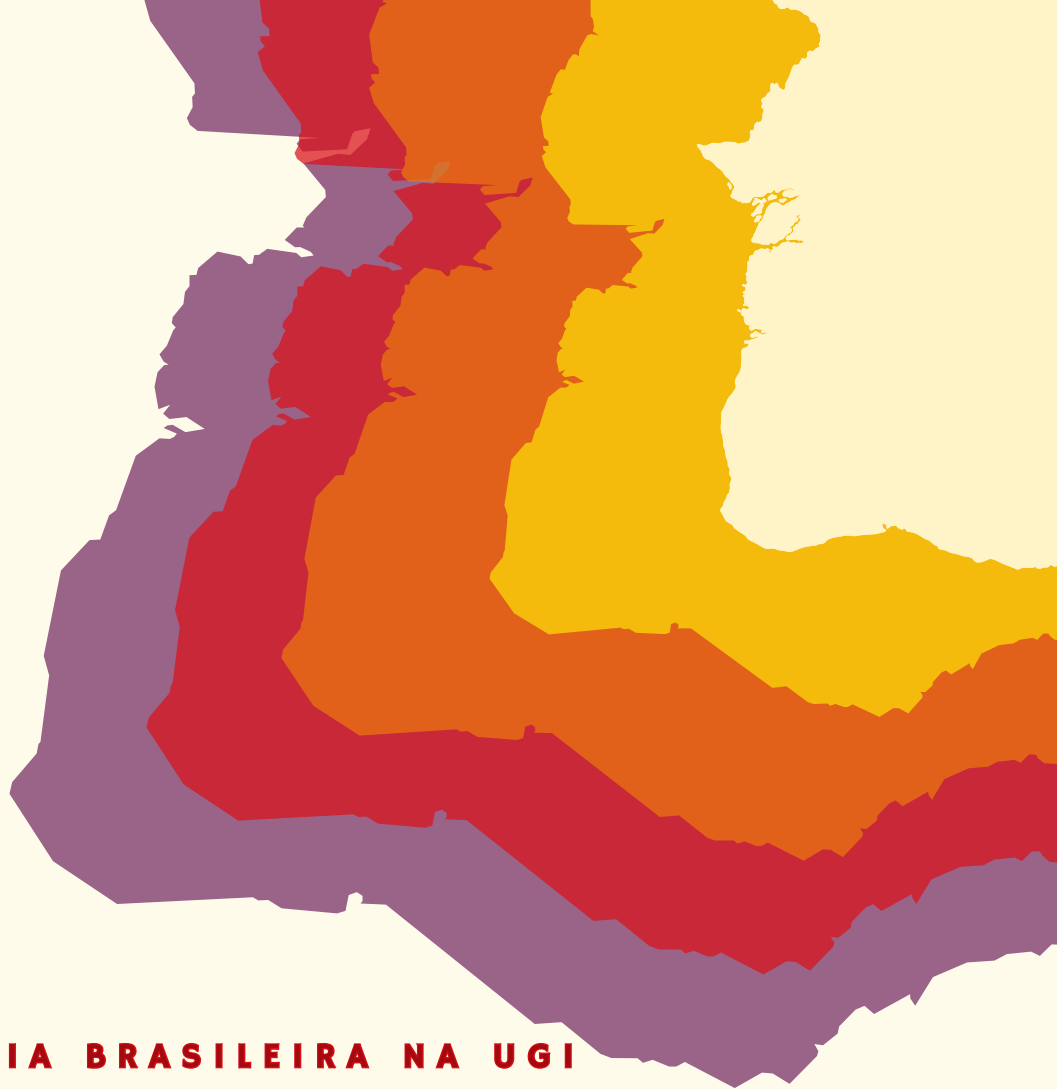
REVISTA DA
**AN
PE
GE**

ISSN 1679-768X

a

ANPEGE

Associação Nacional
de Pós-graduação e
Pesquisa em Geografia



DOSSIÊ GEOGRAFIA BRASILEIRA NA UGI

Avaliação da qualidade da água pluvial e da composição atmosférica urbana na cidade do Rio de Janeiro (Brasil)

*Assessment of rainwater quality and urban atmospheric composition
in the city of Rio de Janeiro (Brazil)*

*Evaluación de la calidad del agua de lluvia y la composición
atmosférica urbana en la ciudad de Río de Janeiro (Brasil)*

DOI: 10.5418/ra2025.v21i44.19778

ANTONIO CARLOS OSCAR JÚNIOR

Universidade do Estado do Rio de Janeiro -
Programa de Pós-graduação em Geografia

TERESA DE JESUS MANUEL

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

V.21 nº44 (2025)
e-issn : 1679-768X

RESUMO: Apesar dos avanços teóricos e metodológicos nos estudos sobre mudanças climáticas em ambientes urbanos, ainda há pouca investigação sobre esses impactos a partir da qualidade da água pluvial. Essa questão é especialmente relevante em países como o Brasil, onde o acesso limitado à água encanada e a intermitência no abastecimento tornam as fontes alternativas indispensáveis. Este estudo tem como objetivo analisar a relação e correlação da qualidade do ar e a composição físico-química da água da chuva no município do Rio de Janeiro, Brasil. As amostras foram coletadas no campus da UERJ, no bairro do Maracanã, uma região predominantemente residencial e de serviços, próxima a vias expressas e à maior floresta urbana do mundo (Parque Nacional da Tijuca). A coleta ocorreu entre 2023 e 2024, e os dados foram analisados em conjunto com registros de emissões atmosféricas secundárias e condições meteorológicas. Os resultados preliminares indicam valores de pH acima de 6,4, sugerindo neutralização da acidez natural da chuva, possivelmente devido à presença de dureza cálcica e amônia. A detecção de íons Cl^- e CaCO_3 pode estar associada à proximidade do mar e à presença de indústrias de cimento e pedreiras na região metropolitana, onde a ação dos ventos intensifica o transporte de material. Os valores de condutividade permaneceram abaixo de $10 \mu\text{S}/\text{cm}$, o que pode ser justificado pela ocorrência de chuvas anteriores que contribuíram para a limpeza atmosférica.

Palavras-chave: clima urbano, deposição úmida, qualidade da água pluvial, qualidade do ar.

ABSTRACT: Despite theoretical and methodological advances in climate change studies in urban environments, little research has been conducted on these impacts through the lens of rainwater quality. This issue is particularly relevant in countries like Brazil, where limited access to piped water and intermittent supply make alternative sources essential. This study aims to analyze the relationship and correlation between air quality and the physicochemical composition of rainwater in the municipality of Rio de Janeiro, Brazil. Samples were collected at the UERJ campus in the Maracanã neighborhood, a predominantly residential and service-oriented area, close to major roads and the world's largest urban forest



(Tijuca National Park). Sampling took place between 2023 and 2024, and data were analyzed alongside secondary atmospheric emissions and meteorological records. Preliminary results indicate pH values above 6.4, suggesting neutralization of the rain's natural acidity, possibly due to the presence of calcium hardness and ammonia. The detection of Cl^- ions and CaCO_3 may be associated with the proximity to the sea and the presence of cement industries and quarries in the metropolitan region, where wind action intensifies material transport. Conductivity values remained below $10 \mu\text{S}/\text{cm}$, which may be explained by prior rainfall events that contributed to atmospheric cleansing.

Keywords: urban climate, wet deposition, rainwater quality, air quality.

RESUMEN: A pesar de los avances teóricos y metodológicos en los estudios sobre el cambio climático en entornos urbanos, sigue habiendo poca investigación sobre estos impactos desde la perspectiva de la calidad del agua de lluvia. Esta cuestión es especialmente relevante en países como Brasil, donde el acceso limitado al agua potable y el suministro intermitente hacen que las fuentes alternativas sean indispensables. Este estudio tiene como objetivo analizar la relación y correlación entre la calidad del aire y la composición fisicoquímica del agua de lluvia en la ciudad de Río de Janeiro, Brasil. Las muestras fueron recolectadas en el campus de la UERJ, en el barrio de Maracanã, una zona predominantemente residencial y de servicios, cercana a vías principales y al bosque urbano más grande del mundo (Parque Nacional de Tijuca). El muestreo se llevó a cabo entre 2023 y 2024, y los datos fueron analizados junto con registros de emisiones atmosféricas secundarias y condiciones meteorológicas. Los resultados preliminares indican valores de pH superiores a 6,4, lo que sugiere una neutralización de la acidez natural de la lluvia, posiblemente debido a la presencia de dureza cálcica y amoníaco. La detección de iones Cl^- y CaCO_3 puede estar asociada con la proximidad al mar y con la presencia de industrias cementeras y canteras en la región metropolitana, donde la acción del viento intensifica el transporte de material. Los valores de conductividad se mantuvieron por debajo de $10 \mu\text{S}/\text{cm}$, lo que podría explicarse por lluvias previas que contribuyeron a la limpieza atmosférica.

Palabras clave: clima urbano, deposición húmeda, calidad del agua de lluvia, calidad del aire.

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização no Brasil começou no século XVI, mas ganhou força no século XVIII, transformando as cidades em elementos fundamentais no cenário social. No decorrer do século XX, com a industrialização e a modernização do campo, o êxodo rural se intensificou, acelerando a migração para os grandes centros e consolidando o processo denominado de urbanização.

Após a Segunda Guerra Mundial, o processo de urbanização ganhou força, contudo, em países como o Brasil, isso ocorreu de maneira acelerada, agravando as desigualdades econômicas e sociais, tanto quanto comprometendo a qualidade ambiental.

De acordo com Silva *et al* (2014),

A ideia de urbanização está intimamente associada à concentração de muitas pessoas em um espaço restrito (a cidade) e na substituição das atividades primárias (agropecuária) por atividades secundárias (indústrias) e terciárias (serviços) (Silva *et al*, 2014, p 3).

Conforme informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2017), a quantidade de indivíduos residindo em áreas urbanas superou a daqueles que habitam zonas rurais, tornando a população brasileira predominantemente urbana. Em 1960, a taxa de urbanização no país era de 45,52%, subindo para 56,8% em 1970 e alcançando cerca de 85% em 2010 (IBGE, 2017).

A expansão urbana mal planejada trouxe como consequência o aumento do desemprego, a deficiência e carência de moradias e o aumento da violência, resultando em cenários urbanos degradados, com baixa qualidade de vida e grandes desafios para a gestão do espaço. Além disso, implicou na degradação da qualidade ambiental, com supressão de áreas verdes, formação de ilhas de calor, poluição do ar e das águas, a gestão inadequada dos resíduos sólidos, impermeabilização do solo e inundações. No mais, as indústrias, motor de uma das fases da urbanização, liberam gases tóxicos que afetam o ser humano, plantas e animais, degradando o ar atmosférico e alterando o caráter das chuvas, tornando-as mais ácidas.

Segundo Monteiro e Mendonça (2003), o clima das cidades é visto como decorrente da modificação do ambiente natural e da sua subsequente troca por um ambiente construído. Portanto, a forma como uma cidade é estruturada e administrada pode atenuar ou intensificar os efeitos climáticos, afetando diretamente a qualidade de vida dos urbanitas.

Com a expansão das cidades, a poluição ambiental aumentou consideravelmente, mas a apreensão

maior é sobre o aumento das concentrações de poluentes na atmosfera, uma vez que são potenciais causadores de transtornos diretos e indiretos ao meio, ao clima e à população (SMAC, 2021).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) estimou que 99% da população mundial respira um ar que ultrapassa os padrões de qualidade estabelecidos pela OMS, representando um risco significativo à saúde.

No Brasil, após o grande marco do lançamento da obra *Teoria e Clima Urbano* (1976) de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro, multiplicaram-se grupos e projetos de pesquisas dedicados ao estudo do clima urbano e dos fatores que exercem influência sobre ele. Trabalhos clássicos já davam conta de compreender a influência da urbanização nas emissões atmosféricas e nos padrões temporo-espaciais de qualidade do ar. Alguns dos principais trabalhos que tratam dessa relação são *Climatologia Urbana: Aspectos Teóricos e Práticos* (1984) e *Ritmo Climático e Poluição Atmosférica: Um Estudo sobre São Paulo* (1992).

Há inquestionável contribuição teórico-metodológica e empírica, a partir dos estudos citados anteriormente, para a compreensão dos impactos dos poluentes atmosféricos na saúde humana, destacando principalmente a relação entre a qualidade do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares. O lastro dessas contribuições segue ao longo do tempo: Moreira e Saldiva (2001), Gouveia et al (2003), Andrade e Jacobi (2008), Moreira (2010), Russo (2010), Dias e Nascimento (2014), Leal (2015), Júnior e Amorim (2016), Maia et al (2019), Santana; Moreira e Armani (2020) e Pascoalino e Júnior (2021), entre tantos outros.

No entanto, há uma lacuna no campo concernente há uma análise detalhada do desdobramento do canal físico-químico na qualidade da água pluvial do espaço urbano, especialmente no que tange à qualidade da água pluvial como indicador de alterações do clima urbano. Isso porque, um dos principais métodos para remover esses poluentes da atmosfera é a deposição úmida. Nesse contexto, os processos que removem a poluição por meio das gotas de chuva e das nuvens são de grande importância, sendo a partir deles que os poluentes são transferidos da atmosfera para a hidrosfera (Leal *et al*, 2004).

Para Oliveira (2016), o conhecimento da composição físico-química da água precipitada pode contribuir para a elaboração de um diagnóstico das condições atmosféricas. Além disso, a precipitação contaminada pelos poluentes atmosféricos pode ter uma série de efeitos adversos: afeta diretamente a saúde da população, as atividades agrícolas e a qualidade dos solos, os corpos d'água e a potabilidade das águas; impacta na fauna e na flora e pode causar a corrosão de materiais de construção, acelerando a deterioração de estruturas históricas e reduzindo a durabilidade de edifícios.

De acordo com os dados disponíveis do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), vinculado ao Ministério das Cidades (MCID), aproximadamente 400 mil pessoas no Rio de Janeiro, área de estudo deste trabalho, não possuem acesso à água encanada. Essa quantidade corresponde a 6,19% da população da cidade com predisposição potencial para o consumo de águas pluviais, dentre outras

fontes, para suprir suas necessidades diárias de consumo.

Mudanças na concentração e nos tipos de poluentes presentes na precipitação podem refletir variações nas fontes de poluição ou nas condições meteorológicas locais. Portanto, o monitoramento contínuo da qualidade da água pluvial poderá complementar os estudos de qualidade do ar, oferecendo uma visão mais abrangente sobre os impactos da poluição atmosférica no ambiente urbano.

A associação dos subsistemas hidrometeorológico e físico-químico, daqueles propostos por Monteiro (1976), como indicador dos poluentes do ar representa uma área de estudo promissora que poderá enriquecer significativamente a compreensão do clima urbano e seus impactos. Além disso, o estudo do sistema climático urbano através da análise da água pluvial é de extrema importância para a Geografia, pois fornece uma compreensão detalhada das dinâmicas climáticas locais, poluição atmosférica, qualidade ambiental e seus impactos na vida urbana.

Pelo exposto, este artigo tem como objetivo avaliar a relação e correlação entre os poluentes atmosféricos e a composição físico-química da água da chuva, buscando uma melhor compreensão sobre a interação entre precipitação e os poluentes atmosféricos, tanto quanto compreender como as características do sítio e as funções urbanas repercutem na espacialidade da qualidade da água precipitada.

Trata-se dos resultados obtidos na pesquisa experimental da primeira fase de um projeto de pesquisa mais amplo que busca demonstrar a importância da temática, tanto quanto oferecer uma metodologia e parametrização para desenvolvimento do campo. A partir da quantificação das espécies químicas encontradas nas águas pluviais, é possível validar as informações já estabelecidas na literatura de que a composição das partículas e dos gases dissolvidos na água da chuva retrata as condições atmosféricas de um determinado sítio (Souza *et al*, 2006), uma vez que as gotas de chuva atravessam esse ambiente durante o processo de precipitação.

A cidade do Rio de Janeiro foi a área escolhida para a realização deste trabalho pelo fato do município ser um dos maiores centros urbanos do Brasil e estar lidando com obstáculos consideráveis em relação à degradação do ar atmosférico. Por ser a região mais urbanizada do estado, a RMRJ enfrenta significativos impactos ambientais, resultantes de intensas transformações espaciais, desmatamento e grande concentração de fontes fixas e móveis de poluição (INEA, 2024).

Conforme aponta Farias (2017), o município enfrenta dificuldades relacionadas ao aumento da poluição atmosférica, especialmente devido ao crescimento industrial e ao tráfego intenso de veículos. A criação de grandes indústrias, como o Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ) e a Companhia Siderúrgica do Atlântico (CSA), trouxe ainda mais complexidade para as emissões atmosféricas na área de estudo, afetando a qualidade do ar.

PADRÕES DE QUALIDADE DO AR

Na década de 1960, diante de diversos incidentes relacionados ao agravamento da poluição atmosférica, os Estados Unidos estabeleceram padrões para determinar a qualidade do ar. Foram definidos padrões de qualidade para o controle de seis poluentes atmosféricos principais: partículas totais, dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂), ozônio (O₃) e chumbo (Pb). Essa iniciativa resultou do avanço e da consolidação de normas legais nos Estados Unidos, como o Clean Air Act (CAA), que destacou o papel crucial do governo na regulação da poluição do ar e culminou na criação da Agência de Proteção Ambiental (EPA). Diversas estratégias regulatórias foram implementadas com o objetivo de abranger tanto as fontes móveis quanto as fontes estacionárias de poluição (US EPA) (Braga *et al*, 2001).

No Brasil, a gestão da qualidade do ar teve origem com a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e foi consolidada pelas Resoluções nº 5/1989 e nº 3/1990, posteriormente revogadas pela Resolução nº 491/2018, todas do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Essas normativas fundamentam o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PROAR).

Em 1990, os parâmetros de qualidade do ar em âmbito nacional foram definidos pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) e aprovados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) por meio da Resolução CONAMA nº 3/1990. Esses parâmetros estabelecem os limites máximos considerados seguros para a saúde da população e para o meio ambiente em relação às concentrações de poluentes na atmosfera.

A Resolução nº 491/2018 do CONAMA (2018) 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, danoso aos materiais, à fauna e à flora, e prejudicial à segurança, ao uso e ao gozo da propriedade, ou às atividades normais da comunidade (CONAMA, 2018, p.1).

De forma resumida, podemos dizer que poluente atmosférico é qualquer substância que comprometa a qualidade do ar.

O nível de poluição atmosférica é determinado pela concentração de substâncias poluentes presentes no ar. A ampla diversidade de substâncias encontradas na atmosfera torna difícil a tarefa de estabelecer uma classificação. Para simplificar essa tarefa, os poluentes são organizados em duas categorias, conforme a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2021):

- Primários: são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão, lançados diretamente na atmosfera.
- Secundários: são aqueles formados na atmosfera através da reação química entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera.

As medições realizadas acerca dos poluentes que influenciam a qualidade do ar são limitadas a um conjunto específico de contaminantes, definidos em razão de sua relevância e dos recursos disponíveis para monitoramento. Esse grupo de contaminantes, adotados universalmente como indicadores da qualidade do ar é constituído de: material particulado (MP), partículas inaláveis (MP_{10}), partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis finas ($MP_{2,5}$), fumaça (FMC), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), enxofre reduzido total (ERT), oxidantes fotoquímicos, como o ozônio (O_3), compostos orgânicos voláteis (COV's) e chumbo, este último em áreas específicas.

A Resolução nº 491/2018 do CONAMA (2018) estabelece o padrão de qualidade do ar aceitável conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Padrões legais de referência para avaliação da qualidade do ar.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$	ppm
Material Particulado - MP_{10}	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
Material Particulado - $MP_{2,5}$	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre – SO_2	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio – NO_2	1 hora ²	260	240	220	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	-
Ozônio – O_3	8 horas ³	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono – CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão – PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	80	-
Chumbo – Pb^5	Anual ¹	-	-	-	0,5	-
¹ - média aritmética anual						
² - média horária						
³ - máxima média móvel obtida no dia						
⁴ - média geométrica anual						
⁵ - medido nas partículas totais em suspensão						

Fonte: CONAMA (2018)

A Organização Mundial de Saúde (OMS) atualizou suas Diretrizes de Qualidade do Ar com critérios mais exigentes, com o objetivo de auxiliar os países a monitorar de forma mais eficaz a qualidade do ar em seus territórios. A tabela 1 apresenta os poluentes e seus limites de concentração de acordo com as recomendações estabelecidas em 2021 (OMS, 2022).

Tabela 2: Novos padrões de concentração de MP_{2,5}, MP₁₀ e NO₂ para avaliação da qualidade do ar.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	µg/m ³
Material Particulado-MP _{2,5}	24 horas	15
	Anual	5
Material Particulado-MP ₁₀	24 horas	45
	Anual	15
Dióxido de Nitrogênio-NO ₂	24 horas	25
	Anual	10

Fonte: OMS (2022)

Considerando a atualização das Diretrizes de Qualidade do Ar da Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2022, o governo do estado do Rio de Janeiro, por meio do Decreto nº 48.668 de 1º de setembro de 2023, estabeleceu a regulamentação dos padrões de qualidade do ar no estado, alinhando-os com as diretrizes nacionais e as recomendações da OMS (Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2023).

A responsabilidade pela aplicação desses novos padrões, bem como pelo planejamento e redimensionamento da rede de monitoramento da qualidade do ar, é atribuída ao Instituto Estadual do Ambiente (Inea). Além disso, o decreto estabelece a criação do Programa Estadual de Monitoramento de Partículas Sedimentáveis, conhecido como "pó preto", visando supervisionar eventos significativos e recorrentes de poluição atmosférica.

De acordo com Ferreira (2023), o pó preto é composto por micropartículas de ferro geradas, entre outras, pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) localizada em Volta Redonda (RJ). Essas partículas, presentes no ar, podem comprometer a saúde da população local e impactar negativamente a qualidade dos rios e solos da região.

A comunidade científica tem manifestado crescente preocupação com o aumento das emissões de gases na atmosfera, suas interações químicas com as águas pluviais e os consequentes impactos no clima urbano, no meio ambiente e na saúde pública. Estudos indicam que poluentes atmosféricos, como óxidos de enxofre e nitrogênio, podem reagir com a água da chuva, formando ácidos que contribuem para a acidificação de rios e solos, afetando ecossistemas e materiais construídos (Reis de Jesus, 2023).

A RELEVÂNCIA DAS CHUVAS NA LIMPEZA DA ATMOSFERA

Estudos sobre a qualidade da água da chuva têm se tornado mais frequentes, impulsionados pelo crescente interesse em sua utilização, e essa preocupação é ainda mais relevante em áreas urbanas devido à presença de poluentes.

Segundo Oliveira (2016), a água pluvial resulta da mistura entre os componentes químicos presentes nas partículas que compõem as nuvens e dos elementos absorvidos pelas gotas de água enquanto caem do céu. Dessa forma, a água da chuva reflete as características das massas de ar, considerando gases e partículas presentes em seu trajeto, o que se evidencia pela variação química da chuva durante o evento de precipitação. Além disso, as condições geográficas e ambientais do sítio onde ocorre influenciam diretamente a qualidade da água pluvial, podendo a chuva conter substâncias químicas e material particulado (Souza *et al*, 2006).

De acordo com Leal *et al* (2004), a chuva contém uma ampla variedade de substâncias químicas, tanto iônicas quanto não iônicas, sendo que os íons desempenham um papel crucial nos processos de acidificação dos corpos hídricos. Entre os componentes mais frequentemente encontrados na água pluvial, destacam-se os íons sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), carbonatos (CO_3^{2-}), sulfitos (SO_3^{2-}), cloreto (Cl^-) e amônio (NH_4^+) (Leal *et al*, 2004).

A precipitação da chuva desempenha um papel essencial na limpeza da atmosfera, pois, além da água, diversos elementos em suspensão, como o dióxido de carbono (CO_2), são removidos. Esse processo impacta no equilíbrio do pH e outras propriedades físico-químicas da água da chuva (Flues; Hama; Fornaro, 2003).

Gonçalves e Massambani (2010) apontaram que a eficiência da remoção de poluentes pela chuva depende de fatores como intensidade da chuva, tamanho das gotículas e propriedades físico-químicas dos poluentes. Por exemplo, chuvas convectivas intensas, comuns em regiões tropicais, mostram maior capacidade de remoção de aerossóis grossos, enquanto precipitações leves e prolongadas são mais eficazes na captura de partículas finas ($<2,5 \mu\text{m}$), associadas à poluição urbana.

Em megalópoles, como São Paulo (Fontenele, Pedrotti; e Fornaro, 2009) e Xangai (Huang *et al.*, 2008), estudos identificaram altas concentrações de íons como sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-) e metais pesados (chumbo, cádmio) na água da chuva, derivados da combustão de combustíveis fósseis e atividades industriais. Contudo, a capacidade de autodepuração atmosférica varia sazonalmente: durante períodos secos, a acumulação de poluentes eleva sua concentração na primeira fração da chuva – efeito *first flush* – (Morgado *et al.*, 2022), enquanto em estações chuvosas, a diluição progressiva reduz esses níveis. Tais resultados sugerem que a qualidade da água pluvial não é apenas um reflexo da poluição atmosférica, mas também da dinâmica hidrometeorológica regional.

Apesar desses avanços, lacunas persistem. Estudos elaborados por Martín et al. (2022) e Campion et al., (2024) apontam para a necessidade de melhor compreensão dos mecanismos de interação entre poluentes emergentes, como microplásticos e produtos farmacêuticos, e as fases da precipitação. Além disso, a maioria dos modelos de deposição úmida, embora precisos para gases e partículas convencionais, ainda subestima a complexidade da química de nuvens em ambientes urbanos, onde a mistura de fontes antrópicas e naturais cria reações não lineares (Pye et al., 2021). Outro desafio destacado é a escassez de dados de longo prazo em cidades do Sul Global, onde a expansão urbana acelerada, com ausência de planejamento e falta de monitoramento contínuo limitam a avaliação de tendências temporais (Farias, 2017).

Por fim, conforme apontam os relatórios do IPCC, as mudanças climáticas podem alterar padrões de precipitação, afetando tanto a eficiência da lavagem atmosférica quanto a qualidade da água pluvial. Conforme Sario, Katsouyanni e Michelozzi (2013), eventos extremos, como tempestades intensas, podem aumentar a deposição de poluentes em curto prazo, mas também elevar o risco de contaminação de corpos hídricos por escoamento superficial carregado de toxinas. Essa dualidade ressalta a urgência de integração da análise combinada da qualidade do ar e dos recursos hídricos, tanto quanto para formulação de políticas, visto que se trate de um tema ainda pouco explorado na literatura. Embora o papel das chuvas na depuração atmosférica seja reconhecido, a interdependência entre atmosfera, hidrosfera e atividades humanas demanda abordagens interdisciplinares, com primazia da ciência Geográfica, para preencher as lacunas entre ciência básica e aplicada.

ÁREA DE ESTUDO

Esta fase do estudo foi realizada no bairro do Maracanã, no município do Rio de Janeiro, que é totalmente urbanizado, com ruas asfaltadas, rios canalizados e rede de esgoto implantada em toda a região. A área da coleta está situada entre uma avenida e uma rua, ambas com grande tráfego de automóveis, ligando a zona norte ao centro e à zona sul. Existe uma estação de metrô próxima, além de várias linhas de ônibus que circulam pela região. Quanto ao uso do solo, pode-se dizer que é de uso predominantemente residencial, embora abrigue diversos colégios e empresas (IBGE, 2022).

Alguns fatores contribuíram para a escolha do bairro onde foi realizado este estudo: a segurança do coletor e da estação meteorológica, instalada no campus principal da UERJ, a viabilidade de flexibilização para a coleta das amostras, otimizando a logística e, principalmente, a existência de estação de monitoramento da qualidade do ar vinculada ao Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar da Prefeitura do Rio de Janeiro, *MonitorAr-Rio*, que fornece dados diários sobre a qualidade do ar.

Em relação à cidade do Rio de Janeiro, os poluentes usualmente selecionados para monitoramento da qualidade do ar, segundo Relatório da Qualidade do Ar de 2024 (INEA), são o monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), ozônio (O₃), material particulado (MP₁₀) e material particulado (MP_{2,5}).

Como exposto, a amostragem foi realizada no *campus* Maracanã da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), dentro da área urbana da cidade conforme Figura 1. As coletas aconteceram em um período de seis meses, mais especificamente entre setembro e novembro de 2023 e janeiro e março de 2024, compreendendo o final da estação menos chuvosa (abril a outubro) e durante a estação mais chuvosa (novembro a março) do município.

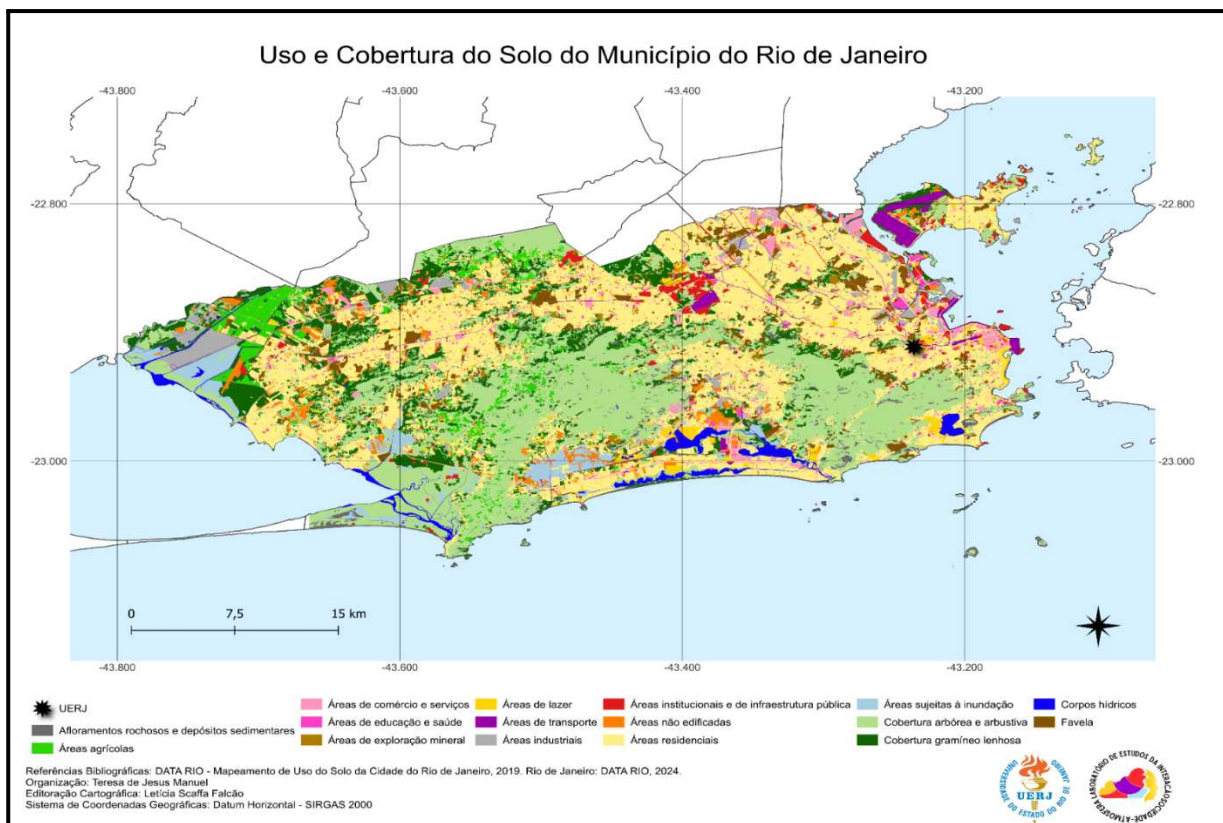


Figura 2: Mapa de cobertura e uso da terra do município do Rio de Janeiro e localização do ponto amostral do estudo

Fonte: Autoria de Letícia Scaffa Falcão, 2024

Por fim, é importante destacar que a área amostral se localiza na Bacia Aérea III, uma das quatro sub-regiões delimitadas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) para o gerenciamento da qualidade do ar. Esta bacia compreende a zona norte do município do Rio de Janeiro e os municípios da Baixada Fluminense, ocupando uma área de cerca de 700 km² que abrange áreas caracterizadas por intensa atividade industrial e elevada densidade populacional, fatores que impactam significativamente a qualidade do ar na região (Cunha e Pimentel, 2007).

A topografia da Bacia Aérea III é influenciada por maciços e baixadas que atuam diretamente na dispersão dos poluentes atmosféricos. O relevo acidentado dificulta a circulação dos ventos, favorecendo a concentração de poluentes em determinadas áreas.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a consecução da pesquisa, com foco na coleta da água pluvial para análise físico-química, fez-se necessário a fabricação de um equipamento de coleta inédito, a 190 cm do solo, baseado em um funil de 70 cm de diâmetro para ampliação da área de coleta e aumento da captação de água (Figura 3), como um recipiente de polietileno de 5 litros acoplado para facilitar o transporte do material para análise. A elaboração do equipamento com estas dimensões foi necessária para a aquisição de uma quantidade de água suficiente para prova e contraprova das amostras, o que seria insuficiente caso fosse utilizado o tradicional pluviômetro Ville de Paris.



Figura 3: Coletor em alumínio com funil acoplado e recipiente de alumínio, antes e após as coletas.

Fonte: acervo pessoal, 2024.

Após a montagem da estrutura do coletor, o funil foi protegido com uma lona de nylon, removida apenas no momento da coleta para evitar a contaminação das amostras. Após cada coleta, tanto o funil quanto o recipiente de armazenamento são higienizados com água destilada de pH 7, secados com papel toalha e novamente cobertos com a lona de nylon até a próxima coleta.

O procedimento de coleta e preservação das amostras seguiu as diretrizes do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras da Agência Nacional de Águas (ANA, 2011). Durante o período de amostragem foram coletadas seis amostras, cada uma obtida em um único evento de precipitação com volume mínimo de 2 litros, suficiente para a realização de todas as análises químicas.

Procedimentos químicos para a análise experimental

Nesta pesquisa, além da leitura da temperatura (°C) e da concentração de alguns íons, foram medidos a condutividade elétrica (CE) e o potencial hidrogeniônico (pH).

As medições de condutividade elétrica, pH e temperatura foram realizadas no local da coleta utilizando equipamentos portáteis com leitura direta.

Para a leitura da condutividade elétrica, foi utilizado o medidor portátil HM Digital TDS-3, com resolução de 1 ppm e precisão de $\pm 2\%$, calibrado com solução padrão de KCl com condutividade de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C. Já os valores de pH e temperatura foram medidos com o aparelho pH Basic da AKSO, que possui precisão de 0,05 para medições de pH. A calibração do equipamento foi realizada com padrões de pH 4,01, 7,00 e 10,01.

Além disso, também foram analisados os íons dissolvidos na água, necessários para traçar uma análise mais completa do perfil da composição e contaminação da água da chuva. Para essa pesquisa, o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Rice, 2017) serviu de referência para a seleção dos procedimentos de análises, dos quais envolvem: Cloreto (Cl^-), mensurado por volumetria através do método 4500- Cl^- B para a determinação de cloro residual em amostras de água a partir da titulometria com tiosulfato de sódio; Nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-) através do método 4110 B, baseado na cromatografia iônica com detecção por condutividade; Amônia (NH_3) pelo Método 4500- NH_3 F, espectrofotometria com azul de indoferol; Sulfato (SO_4^{2-}) a partir do método 4500- SO_4^{2-} baseado na cromatografia iônica; e Carbonato (CO_3^{2-}) por volumetria a partir do método 2340 C em que a determinação de sólidos dissolvidos totais (SDT) em amostras se dá pela filtração e pesagem de sólidos dissolvidos.

Dados secundários e procedimento estatístico para análise dos dados

Para uma melhor análise entre as emissões e composição química da atmosfera urbana e as características físico-químicas da água da chuva, foram obtidos os dados do Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar da Prefeitura do Rio de Janeiro (MonitorAr-Rio) da estação São Cristóvão para os mesmos dias das amostras de chuvas coletadas. Trata-se da estação de monitoramento de qualidade do ar mais próxima do ponto amostral de coleta da água da chuva, em um raio inferior a 5 km, e os parâmetros disponibilizados foram: NO₂, NO, O₃ e MP₁₀.

Para a análise dos dados físico-químicos da água pluvial e dos poluentes atmosféricos foi utilizada a correlação de Spearman (ρ), uma técnica não paramétrica que mede a força e a direção da associação monotônica entre duas variáveis. Os coeficientes de correlação indicam a intensidade da relação entre diferentes variáveis, variando de -1 a +1, sendo que o valor zero representa a ausência de correlação. O sinal do coeficiente também é relevante, pois revela a direção dessa relação.

De acordo com Capp e Nienov (2020: 178), “A principal vantagem da correlação é que conseguimos demonstrar o comportamento do relacionamento: se positivo ou negativo (inverso)”. Os autores destacam que também é possível realizar uma avaliação qualitativa da intensidade do grau de correlação entre as variáveis, conforme ilustrado na tabela 3.

Tabela 3: Avaliação qualitativa do grau de correlação entre duas variáveis a partir de Spearman.

Coefficiente de Correlação	Intensidade da Correlação
0,000	Nula ou inexistente
0,001 a 0,299	Fraca
0,300 a 0,599	Regular ou moderada
0,600 a 0,899	Forte
0,900 a 0,999	Muito forte
1,000	Plena ou perfeita

Fonte: Capp e Nienov (2020, p.179)

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos dados secundários permite compreender a influência de variáveis atmosféricas sobre a composição química da água pluvial. Os resultados indicam que a qualidade do ar (Tabela 4), particularmente a concentração de poluentes gasosos e material particulado, apresenta relação direta com as condições meteorológicas, como temperatura e precipitação, afinal estão intimamente relacionado com os padrões sinóticos de circulação da atmosfera, que atuam decisivamente no escoamento atmosférico e, portanto do material em suspensão na atmosfera.

Tabela 4: Dados da Qualidade do Ar – Estação Tijuca, MonitoAr Rio, SMAC (concentração $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

DATA	Precipitação (mm)	Temp (°C)	[NO ₂]	[NO]	[O ₃]	[MP ₁₀]
28/09	7,0	22,65	6,46	0,97	55,44	20,67
19/11	2,0	29,43	-	-	77,19	27,33
23/11	13,6	24,63	26,87	2,19	57,91	18,83
11/01	4,8	39,98	56,01	6,3	61,52	37,5
31/01	14,4	27,68	38,84	4,12	32,89	31,83
07/03	40,4	25,75	18,66	1,34	-	7,17

Fonte: Autoria própria, 2025.

Os dados da qualidade do ar demonstram uma tendência de aumento das concentrações de poluentes gasosos, como NO₂, NO e O₃, à medida que a temperatura do ar se eleva. Esse comportamento pode ser atribuído à intensificação das reações fotoquímicas que ocorrem em condições de maior radiação solar, promovendo a conversão de óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis em ozônio troposférico. A correlação positiva entre MP₁₀ e temperatura reforça essa hipótese, indicando uma possível contribuição de processos de resuspensão de partículas e formação secundária de aerossóis.

A composição química da água pluvial analisada (Tabela 5) revelou concentrações de íons majoritariamente abaixo dos limites estabelecidos para águas potáveis, sugerindo que a influência da poluição atmosférica não foi suficiente para comprometer significativamente a qualidade das amostras analisadas no bairro Maracanã. O pH das amostras manteve-se próximo da neutralidade, variando entre 6,12 e 6,76, o que pode ser explicado pela presença de compostos alcalinos, como amônia (NH₃) e carbonato de cálcio (CaCO₃), que atuam como neutralizadores da acidez.

A forte correlação positiva entre a condutividade elétrica e as concentrações de nitrito (NO₂⁻) e carbonato de cálcio (CaCO₃) ($\rho = 0,9$) sugere que essas espécies são os principais contribuintes para a carga iônica dissolvida na água da chuva. Essa relação pode estar associada a fontes antrópicas, como emissões

veiculares e industriais, além de partículas suspensas oriundas de atividades de construção civil, muito características na bacia aérea onde se insere a área de estudo.

Tabela 5: Composição química da água pluvial coletada no campus Maracanã-UERJ (mg/mL).

LQP = Limite de Quantificação Praticada.

AMOSTRA	pH	CE	[SO ₄ ⁻²] LQP10	[NO ₃ ⁻] LQP0,4	[NO ₂ ⁻] LQP0,4	[Cl ⁻] LQP0,5	[CaCO ₃] LQP1	[NH ₃] LQP0,02
Nº 1	6,4	7	9	0,32	0,005	1,51	-	-
Nº 2	6,76	10	9	0,576	0,39	1,90	6,03	1,25
Nº 3	6,43	2	9	0,39	0,005	2,37	0,9	0,42
Nº 4	6,12	15	9	0,971	0,39	1,42	8,20	0,9
Nº 5	6,22	4	9	0,39	0,005	2,84	0,9	0,41
Nº 6	6,19	12	9	0,39	0,39	0,98	9,08	0,56

Fonte: Autoria própria, 2025.

A matriz de correlação de Spearman (Tabela 6) revelou associações estatisticamente significativas entre diferentes parâmetros, permitindo inferências sobre os processos físicos e químicos que governam a interação entre a atmosfera e a água da chuva na área de estudo e período analisado.

Tabela 6: Matriz de Correlação entre os poluentes atmosféricos e a concentração dos parâmetros de qualidade das águas pluviais, ($p < 0,05$).

	Tem p	[NO ₂] l	[NO] l	[O ₃]	[MP ₁₀] o]	pH	CE	[NO ₃] l	[NO ₂] l	[Cl ⁻]	[CaCO ₃] s]	[NH ₃] l
Temp	1,0											
[NO ₂]	0,9	1,0										
[NO]	0,9	1,0	1,0									
[O ₃]	0,6	0,4	0,4	1,0								
[MP ₁₀]	0,7	0,7	0,7	0,1	1,0							
pH	-0,3	-0,5	-0,5	0,4	-0,3	1,0						
CE	0,6	0,0	0,2	0,6	0,3	-0,6	1,0					
[NO ₃ ⁻]	0,9	0,9	0,9	0,7	0,6	-0,2	0,6	1,0				
[NO ₂ ⁻]	0,7	0,3	0,3	0,9	0,1	-0,3	0,9	0,7	1,0			

[Cl ⁻]	-0,1	0,2	0,2	-0,5	0,3	0,5	-0,8	-0,2	-0,7	1,0		
[CaCO ₃]	0,3	-0,3	-0,3	0,7	-0,2	-0,6	0,9	0,3	0,9	-1,0	1,0	
[NH ₃]	0,6	0,2	0,2	1,0	0,1	0,1	0,6	0,8	0,9	-0,6	0,6	1,0

Fonte: Autoria própria, 2025.

A análise da correlação de Spearman revelou interações importantes entre os parâmetros atmosféricos e a composição da água pluvial. A correlação significativa entre ozônio (O₃) e nitrito (NO₂) ($\rho = 0,9$) indica que a formação de O₃ troposférico está fortemente relacionada à presença de compostos de nitrogênio na atmosfera. Esse resultado é consistente com estudos anteriores que apontam a oxidação de NO₂ como um dos principais mecanismos de produção de O₃ em ambientes urbanos (Leal et al, 2004). Além disso, a correlação elevada entre amônia (NH₃) e nitrato (NO₃⁻) ($\rho = 0,8$) reforça a hipótese de que a amônia desempenha um papel fundamental na química atmosférica, contribuindo para a formação de nitratos por meio de processos de oxidação.

No que diz respeito à amônia (NH₃), a literatura aponta que as principais fontes atmosféricas que influenciam as concentrações das moléculas NH₃ e NH₄⁺ são as emissões biogênicas decorrentes da decomposição de matéria orgânica, processos metabólicos (incluindo tanto humanos quanto animais), práticas de agropecuária intensiva e queimas de biomassa. Também se encontra estabelecido na literatura que, no município do Rio de Janeiro, a quantidade de NH₃ liberada na atmosfera está relacionada ao despejo de esgoto sem tratamento na Baía de Guanabara (Guimarães; De Melo, 2006).

A capacidade da amônia atuar como um neutralizador da acidez nas águas da chuva se deve ao seu comportamento ao ser dissolvida em água, onde se liga ao íon hidrogênio livre (H⁺), cuja presença confere a característica ácida, formando, nesse caso, o íon amônio (NH₄⁺), e, conseqüentemente, diminuindo a acidez do sistema (Marques, 2011).

Com base nos resultados alcançados, há evidências que a presença e a influência da característica básica da amônia devem ser parâmetros significativos a serem levados em conta neste estudo. Isso se deve ao fato de que os valores de pH das amostras analisadas (Tabela 5) estão todos superiores a 6,0, indicando que são menos ácidos do que o esperado para as águas da chuva, cuja faixa de pH normalmente varia entre 4,0 e 5,8.

Outro resultado relevante foi a correlação negativa intensa entre cloreto (Cl⁻) e carbonato de cálcio (CaCO₃) ($\rho = -1,0$), sugerindo um possível efeito do íon comum ou diferenças na solubilidade dessas substâncias na água da chuva. Considerando a localização geográfica da área de estudo, a presença de cloreto pode estar associada tanto à influência de aerossóis marinhos quanto a emissões industriais e veiculares. A

interação entre esses íons pode ter implicações na composição química das precipitações, afetando sua capacidade tampão e o potencial de acidificação.

A presença de carbonato de cálcio na atmosfera comumente está relacionada à poeira do solo, em geral, proveniente de atividades de construção civil e das indústrias de papel, tintas, vidros, cerâmica e cimento. Conceição et al (2011) realizou uma pesquisa em que analisou a composição química das águas da chuva na bacia do Alto Sorocaba-SP, coletando amostras ao longo de um ano. O estudo revelou que as elevadas concentrações de íons CO_3^{2-} na atmosfera são oriundas de atividades antrópicas, e que esses íons desempenham um papel significativo como agentes neutralizadores do pH das águas pluviais na região.

O íon carbonato apresenta uma característica química básica, pois, ao entrar em contato com a água, observa-se a liberação dos íons OH^- , o que caracteriza essa espécie como uma base, sendo capaz de diminuir a acidez do meio, da mesma maneira que a amônia discutida anteriormente.

Essa constatação tem importante valor empírico para os estudos da qualidade da água pluvial, até então com muito foco e atenção na acidez. Entretanto, o que se demonstra é que os compostos presentes nessa água, carregados da atmosfera, também importam, mesmo que em situação de basicidade.

Finalmente, foram constatados níveis de cloreto variando entre 0,98 mg/L e 2,84 mg/L. Considerando a localização costeira da cidade, os íons de cloreto detectados na água da chuva são, em grande parte, resultantes de aerossóis de sal marinho, contudo, é importante não ignorar as contribuições de emissões geradas por indústrias e veículos, abundantes na bacia aérea III.

Em pesquisa conduzida por De Souza, De Mello e Maddock (2021) nos bairros do Maracanã e Deodoro, ficou constatado que os íons de cloreto e sódio estavam presentes em maiores quantidades em ambos os bairros, sugerindo que a composição química das águas pluviais também é significativamente afetada pelos aerossóis de sal marinho, dada atuação da brisa marinha em ambas as localidades.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os parâmetros analisados, o pH das águas pluviais apresentou valores acima de 6, o que é pouco comum em regiões com intensas atividades antrópicas; então, algo está acarretando a redução da acidez das chuvas.

Ao aplicarmos o teste de correlação de Spearman, foram encontradas correlações significativas entre os poluentes atmosféricos e os parâmetros físico-químicos, como por exemplo: a condutividade, a concentração de ozônio, os óxidos de nitrogênio, a amônia, o cloreto e o carbonato de cálcio. Essas correlações, aliadas às características urbanas da área de estudo, indicam que a qualidade do ar tem sido fortemente impactada pelas atividades humanas.

Mudanças na concentração e nos tipos de poluentes presentes na precipitação podem refletir variações nas fontes de poluição ou nas condições meteorológicas locais, reforçando a importância do monitoramento contínuo da qualidade da água pluvial como um complemento essencial aos estudos de qualidade do ar, oferecendo uma visão mais abrangente sobre os impactos da poluição atmosférica no ambiente urbano.

Os resultados obtidos nessa pesquisa podem ajudar no desenvolvimento de políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade do ar e da água de forma interseccional, além de estratégias para reduzir a poluição urbana. Visto que, com monitoramento adequado, a formulação destas políticas se torna mais eficaz por meio de melhorias de infraestruturas, investimento tecnológico e a criação de ações mitigadoras, é possível promover um ambiente urbano mais saudável e resiliente.

No mais, do ponto de vista teórico, demonstra-se as múltiplas possibilidades de derivações do Sistema Clima Urbano proposto por Monteiro (1976) em novas abordagens para o campo da Climatologia Urbana no Brasil que mesmo após 50 anos, pouco inovou em sua abordagem.

Por fim, é importante destacar que esse artigo sistematiza os resultados da primeira fase experimental de uma pesquisa mais ampla de monitoramento da qualidade da água da chuva no município do Rio de Janeiro. Atualmente, houve ampliação dos pontos amostrais para representatividade das áreas urbano-industriais do município que, em contraste com a que foi analisada aqui, já apresentam outros resultados, significativamente diferentes, reforçando que as funções urbanas são de extrema importância para compreensão espacial da qualidade da água da chuva.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (Brasil); COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*. Brasília, DF: ANA; São Paulo: CETESB, 2011. 327p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/Guia-nacional-de-coleta-e-preservacao-de-amostras-2012.pdf>. Acesso em: 18 dez, 2024.

ALEXANDRE DE SOUZA, Patricia; DE MELLO, William Zamboni; MADDOCK, John Edmund Lewis. Composition and sources of major inorganic constituents in Rainwater from the city of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. *Revista Desafios – Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins*, v. 08, n. 01, p. 47-64, 2021. <https://doi.org/10.20873/uftv8-8595>. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/desafios/article/view/8595>. Acesso em: 14 out, 2024.

BRAGA, Alfesio; PEREIRA; Luiz Alberto Amador; BÖHM, György Miklós; SALDIVA, Paulo. Poluição atmosférica e saúde humana. *Revista USP*, [S.L.], n. 51, p. 58, 2001. Universidade de São Paulo, Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA).

CAMPION, Danilo et al. Caracterização de microplásticos em amostras atmosféricas coletadas em Porto Velho e em reserva florestal da Amazônia. 2024, *Anais..* São Paulo: Pró-Reitoria de Pesquisa da USP, 2024. Disponível em: <https://uspdigital.usp.br/siicusp/siicPublicacao.jsp?codmnu=7210>. Acesso em: 23 fev. 2025.

CAPP, Edson; NIENOV, Otto Henrique (org.). *Bioestatística Quantitativa Aplicada*. Porto Alegre: UFRGS, 2020. E-book (260p.) P&B. ISBN: 978-65-86232-43-1. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/213116/001117616.pdf>. Acesso em: 15 nov, 2024.

CONAMA n° 003, de 28 de junho de 1990. Disponível em: CONAMA n° 003, de 28 de junho de 1990. Acesso em: 6 jan, 2025.

CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=15457. Acesso em: 6 jan, 2025.

CONAMA n° 491, de 19 de novembro de 2018. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=766. Acesso em: 6 jan, 2025.

CONCEIÇÃO, Fabiano Tomazini da; SARDINHA, Diego de Souza; NAVARRO, Guillermo Rafael Beltran; ANTUNES, Maria Lúcia Pereira; ANGELUCCI, Vivian Andréa. Composição química das águas pluviais e deposição atmosférica anual na bacia do Alto Sorocaba (SP). *Química Nova*, [S.L] v.34, n. 4, p.610-616, 2011. FapUNIFESP (SciELO). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000400011>. Disponível em: <https://www.scielo.br/jn/qn/a/RbFFqHC7SfbZHVscYrfQhLG/?lang=pt> Acesso em: 12 nov, 2024.

CUNHA, Bruno D.; PIMENTEL, Luiz C. G. Modelagem da concentração de poluentes na bacia aérea III via modelo AERMOD considerando processos de deposição. *Anais.V Workshop Brasileiro de Micrometeorologia*, 2007.

FERREIRA, Francisco Eduardo. *Monitoramento da qualidade do ar no Rio de Janeiro será ampliado*. Agência Brasil, Rio de Janeiro, 17 de setembro de 2023, Geral. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-09/monitoramento-da-qualidade-do-ar-no-rio-de-janeiro-s-era-ampliado>. Acesso em 12 jan, 2025.

FLUES, Marlene; HAMA, Patrícia; FORNARO, Adalgiza. Avaliação do nível da vulnerabilidade do solo devido à presença de termelétrica a carvão (Figueira, PR- Brasil). *Química Nova*, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 479-483, ago. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422003000400006>.

FONTENELE, Anna Paula Godoy; PEDROTTI, Jairo J.; FORNARO, Adalgiza. Avaliação de metais traços e íons majoritários em águas de chuva na cidade de São Paulo. *Química Nova*, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 1062-1067, 2009.

GONÇALVES, Fábio Luiz Teixeira; MANTOVANI JUNIOR, Luiz Carlos; FORNARO, Adalgiza; PEDROTTI, Jairo José. Modelagem dos processos de remoção sulfato e dióxido de enxofre presente no particulado em diferentes localidades da região metropolitana de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, SP, v. 28, n. 1, p. 109-119, 2010. FapUNIFESP (SciELO).

GONÇALVES, Fábio Luiz Teixeira; MASSAMBANI, Oswaldo. Uma análise do coeficiente de remoção de poluentes em função do espectro de gotas de chuva em diferentes localidades no Brasil e Alemanha. *Química Nova*, São Paulo, v. 33, n. 5, p. 1027-1033, 2010.

GUIMARÃES, Giselle Parno; DE MELLO, William Zamboni. Estimativa do fluxo de amônia na interface ar-mar na Baía de Guanabara: estudo preliminar. *Química Nova*, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 54-60, fev. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422006000100012>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/B7Kfv9dx5QJHfZ3DgPQtVjJ/?lang=pt>. Acesso em: 12 nov, 2024.

HUANG, K.; ZHUANG, G. S.; XU, C.; WANG, Y.; TANG, A. The chemistry of the severe acidic precipitation in Shanghai, China. *Atmospheric Research*, v. 89, n. 1-2, p. 149-160, 2008. DOI: 10.1183/09031936.00074712

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil) (2017). *Sinopse do Censo Demográfico de 2010*. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 15 dez, de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil) (2022). *Cidades e Estados do Brasil*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama>. Acesso em: 15 dez, de 2024.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE(RJ)-INEA. *Relatório Anual da Qualidade do Ar do estado do Rio de Janeiro: 2019_2022*. Rio de Janeiro: INEA, 2024, 247p.

LEAL, Tatiana F. M.; FONTENELE, Anna P. G.; PEDROTTI, Jairo J.; FORNARO, Adalgiza. Composição iônica majoritária de águas de chuva no centro da cidade de São Paulo. *Química Nova*, [S.L.], v. 27, n. 6, p. 855-861, dez. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422004000600003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/czPXPOBm74RBj8njKzLYGzS/?lang=pt>. Acesso em: 10 jan, 2025.

MARQUES, Rodrigo. *Avaliação temporal da composição química das águas de chuva e do material particulado inalável: estudo aplicado à Cuiabá-MT*. 2011. 111 f. Tese (Doutorado) - Curso de Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MARTÍN, Julia; SANTOS, Juan Luis; APARICIO, Irene; ALONSO, Esteban. Microplastics and associated emerging contaminants in the environment: Analysis, sorption mechanisms and effects of co-exposure. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, v. 35, 2022, e00170. ISSN 2214-1588. DOI: 10.1016/j.teac.2022.e00170.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo, MENDONÇA, Francisco (ORGS). *Clima urbano*. São Paulo: Ed. Contexto, 192p, 2003.

MONTEIRO, C. A. de F. *Teoria e Clima Urbano*. 1976. São Paulo: Série Teses e Monografia. n. 25, 181 p. Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Geografia/FFLHC, Universidade de São Paulo, 1976.

MORGADO, Michele E.; HUDSON, Claire L.; CHATTOPADHYAY, Suhana; TA, Kaitlin; EAST, Cheryl; PURSER, Nathan; ALLARD, Sarah; FERRIER, M. Drew; SAPKOTA, Amy R.; SHARMA, Manan; GOLDSTEIN, Rachel Rosenberg. The effect of a first flush rainwater harvesting and subsurface irrigation system on *E. coli* and pathogen concentrations in irrigation water, soil, and produce. *Science of The Total Environment*, v. 843, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156976.

OLIVEIRA, Jussara Clarissa Alves de Lima. *Análise qualitativa de poluentes na água de chuva em diferentes cenários no semiárido pernambucano: zona urbana, zona rural e área industrial*. Dissertação - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro Acadêmico do Agreste,

Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29121>. Acesso em: 28 nov, 2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS) – Região das Américas., ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). *Billions of people still breathe unhealthy air: new WHO data*. Genebra, 2022. Disponível em: <https://www.paho.org/en/news/4-4-2022-billions-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data> . Acesso em: 6 jan, 2025.

PYE, HOT.; NENES, A.; ALEXANDER, B.; AULT, A. P.; BARTH, M. C.; CLEGG, S. L.; COLLETT, J. L. Jr; FAHEY, K. M.; HENNIGAN, C. J.; HERRMANN, H.; KANAKIDOU, M.; KELLY, J. T.; KU, I. T.; McNEILL, V. F.; RIEMER, N.; SCHAEFER, T.; SHI, G.; TILGNER, A.; WALKER, J. T.; WANG, T.; WEBER, R.; XING, J.; ZAVERI, R. A.; ZUEND, A. The acidity of atmospheric particles and clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 20, n. 8, p. 4809-4888, 24 abr. 2020. DOI: 10.5194/acp-20-4809-2020.

REIS DE JESUS, Emanuel Fernando. A importância do estudo das chuvas ácidas no contexto da abordagem climatológica. *Sitientibus*, [S. l.], n. 14, 2023. <https://doi.org/10.13102/sitientibus.vi14.9960>. Disponível em: <https://periodicos.uefs.br/index.php/sitientibus/article/view/9960> . Acesso em: 15 jan. 2025.

RICE, Eugene W., BRIDGEWATER, Laura e American Public Health Association (Eds.). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC: American public health association, ed. 23, 2017. Disponível em: <https://yabesh.ir/wp-content/uploads/2018/02/Standard-Methods-23rd-Perv.pdf>. Acesso em: 2 out, 2024.


RIO DE JANEIRO (Estado). Decreto nº 48.668, de 01 de setembro de 2023. Regulamenta os padrões de qualidade do ar no estado do Rio de Janeiro, tendo por base padrões nacionais e as diretrizes e recomendações da Organização Mundial de Saúde, e dá outras providências. *Diário Oficial do Estadual do Rio de Janeiro*: parte 1, Rio de Janeiro, ano XLIX, n. 165, 4 set. 2023. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rj/decreto-n-48668-2023-rio-de-janeiro-regulamenta-os-padroes-de-qualidade-do-ar-no-estado-do-rio-de-janeiro-tendo-por-base-padroes-nacionais-e-as-diretrizes-e-recomendacoes-da-organizacao-mundial-de-saude-e-da-outras-providencias>. Acesso em 10 jan, 2025

SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE DA CIDADE (Rio de Janeiro). *Boletim da Qualidade do Ar*. Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar – MonitorAr-Rio. Prefeitura do Rio de Janeiro: SMAC, 2021. Disponível em: <https://ambienteclima.prefeitura.rio/monitoramento-diario-da-qualidade-do-ar>. Acesso em: 15 nov, 2024.


SILVA, José Adailton Barroso; BARROSO, Rita de Cássia Amorim; RODRIGUES, Auro Jesus; COSTA, Silvania Santana; FONTANA, Raphael Luiz Macêdo. A urbanização no mundo contemporâneo e os problemas ambientais. *Caderno de Graduação*, Ciências Humanas e Sociais Unit, Aracaju, v.2, n.2, p.197-207, 2014. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernohumanas/article/view/1723>. Acesso em: 25 out, 2024.

SOUZA, Patricia Alexandre de; MELLO, William Zamboni de; MALDONADO, Juan; EVANGELISTA, Heitor. Composição química da chuva e aporte atmosférico na Ilha Grande, RJ. *Química Nova*, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 471-476, jun. 2006. *FapUNIFESP (SciELO)*. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422006000300013>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/zcd7c7MvRVdFMwBdqgjx7MC/?lang=pt> Acesso em: 6 jan, 2025.

SOBRE OS AUTORES

Antonio Carlos Oscar Júnior  - Doutor em Geografia pela UNICAMP (2018), Mestre e Bacharel em Geografia pela UFRJ (2014; 2011). Desenvolve atividades na grande área de Geografia Física, com ênfase em: Climatologia, Riscos Ambientais, Desastres Naturais, Gestão Territorial, Geografia da Saúde e Políticas Públicas. Exerceu a função de Diretor de Planejamento Urbano na Subsecretaria de Urbanismo da Prefeitura Municipal de Duque de Caxias (RJ) onde gerenciou diversos projetos de gestão urbana. Também foi consultor do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTi) elaborando subsídios para a III Comunicação Nacional para a Convenção Quadro da ONU sobre Mudanças Climáticas. Atualmente é Professor Assistente do Departamento de Geografia Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (DGF/IGEOG/UERJ), do Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGEO/UERJ), membro e conselheiro da Associação Brasileira de Climatologia (ABClima) e Representante da América Latina junto à Comissão Internacional de História da Meteorologia (ICHM) da União Internacional em História e Filosofia da Ciência e Tecnologia (2018-2021)

E-mail: thony.oscar@gmail.com

Teresa de Jesus Manuel  - Doutoranda em Geografia na Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Mestre em Gestão Ambiental pela Universidade Estácio de Sá, possui Pós-Graduação em Docência do Ensino Superior e em Educação Especial e Inclusiva pela Universidade Cândido Mendes e Graduação em Química - Licenciatura e Bacharel - pela Faculdade de Humanidades Pedro II, É professora da carreira de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Colégio Pedro II, no Rio de Janeiro, desde 2005, lotada no Campus Engenho Novo II, no qual exerceu funções docentes e administrativas, destacando-se Assessoria da Direção, Coordenação do PROEJA, Direção Pedagógica e membro da Comissão Permanente de Pessoal Docente da Instituição. Atualmente, é Coordenadora Pedagógica da equipe de Química do Campus Engenho Novo II. Foi docente da Secretaria Estadual de Educação do Rio de Janeiro, no período de 2002 a 2010, e docente do Ensino Superior na Universidade Gama Filho de 1992 a 2014, tendo atuado na Coordenação de Química no período de 2010 a 2014.

E-mail: terraffa@gmail.com

Data de submissão: 01 de janeiro de 2024

Aceito para publicação: 23 de abril de 2025

Data de publicação: 06 de junho de 2025