

Modelagem estatística da influência de material particulado (MP₁₀) na saúde da população de Santa Gertrudes - SP

Pollyane Vieira da Silva^{1†}, Eduarda da Silva², Magda Adelaide Lombardo³

¹Universidade Federal de Pelotas; Instituto de Física e Matemática; Departamento de Matemática e Estatística.

²Universidade Federal de Pelotas; Faculdade de Veterinária.

³Universidade de São Paulo; Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais.

Resumo: A poluição atmosférica, com ênfase no material particulado (MP), representa uma ameaça significativa à saúde humana, ganhando maior relevância em regiões densamente industrializadas, como Santa Gertrudes, SP. Torna-se importante utilizar ferramentas capazes de monitorar a concentração de material particulado nas regiões sob a influência do polo cerâmico de Santa Gertrudes. Além de estudar sobre os efeitos adversos do material particulado à saúde. Este estudo longitudinal de 4 anos (2020-2023), empregando modelos lineares generalizados, visa compreender a influência do MP na saúde da população local. Os resultados indicam uma associação inversa entre a umidade relativa do ar e a concentração de MP₁₀, destacando a complexidade das interações entre fatores ambientais. A análise temporal revela uma conexão entre óbitos e a concentração de MP₁₀, com um lag de 4 dias, sugerindo uma exposição temporal que pode ter contribuído para agravar quadros de saúde. No âmbito dos períodos de internação, a complexidade aumenta, identificando relações envolvendo MP₁₀ com lags de 3, 4 e 5 dias, além de variáveis como Umidade relativa do ar e Velocidade do vento. Estas descobertas sublinham a natureza multifatorial dos impactos da poluição atmosférica na saúde, enfatizando a importância de abordagens integradas em políticas públicas e ações preventivas. Em particular, durante crises sanitárias, como a pandemia de COVID-19, as conclusões ressaltam a urgência de estratégias direcionadas para mitigar os efeitos adversos da poluição atmosférica, visando preservar a saúde e o bem-estar da comunidade de Santa Gertrudes e áreas análogas.

Palavras-chave: Poluição atmosférica; polo cerâmico; doenças respiratórias; regressão logística.

Statistical modeling of the influence of particulate matter (MP₁₀) on the health of the population of Santa Gertrudes - SP

Abstract: Atmospheric pollution, with an emphasis on particulate matter (PM), represents a significant threat to human health, gaining greater relevance in densely industrialized regions, such as Santa Gertrudes, SP. It is important to use tools capable of monitoring the concentration of particulate matter in regions under the influence of the Santa Gertrudes ceramics hub, in addition to studying the adverse effects of particulate matter on health. This 4-year longitudinal study (2020-2023), employing generalized linear models, aims to understand the influence of MP on the health of the local population. The results indicate an inverse association between relative air humidity and PM₁₀ concentration, highlighting the complexity of interactions between environmental factors. The temporal analysis reveals a connection between deaths and the concentration of PM₁₀, with a lag of 4 days, suggesting a temporal exposure that may have contributed to worsening health conditions. Within the scope of hospitalization periods, the complexity increases, identifying relationships involving MP₁₀ with lags of 3, 4 and 5 days, in addition to variables such as relative air humidity and wind speed. These findings highlight the multifactorial nature of the health impacts of air pollution, emphasizing the importance of integrated approaches in public policies and preventive actions. In particular, during health crises, such as the COVID-19 pandemic, the conclusions highlight the urgency of targeted strategies to mitigate the adverse effects of air pollution, aiming to preserve the health and well-being of the community of Santa Gertrudes and similar areas.

Keywords: Atmospheric pollution; ceramic pole; respiratory diseases; logistic regression.

† Autor correspondente: pollyane.silva@ufpel.edu.br

Manuscrito recebido em: 05/06/2024

Manuscrito revisado em: 17/09/2024

Manuscrito aceito em: 18/09/2024

Introdução

No começo do século XX, o ar necessário para a respiração de todos os seres vivos da Terra ainda não era abordado de forma tão evidente, pois acreditava-se que este estaria constantemente disponível de forma a manter a vida no planeta (RUSSO, 2010). O número crescente da circulação de veículos no mundo e as atividades industriais são fatores que contribuem fortemente para a poluição da atmosfera (CESAR *et al.*, 2013). Esta pode ser originada também por fontes naturais como queima acidental de biomassa (material derivado de plantas ou animais) e erupções vulcânicas (CANÇADO *et al.*, 2006; GONÇALVES *et al.*, 2010). Novas fontes de poluentes, como a queima de combustíveis fósseis pelos motores, a combustão e a expansão das indústrias siderúrgicas ganharam força com a revolução industrial e isso ocorreu sem um acompanhamento dos possíveis danos que esses poluentes poderiam causar à saúde humana (COELHO, 2007; MARIO, 2012).

Vários estudos vêm demonstrando a existência de associação entre os efeitos da poluição do ar na saúde, mesmo quando os níveis médios de poluentes não são tão altos. Atualmente, diversos estudos vêm usando o número de internações hospitalares como um indicador dos efeitos da poluição na saúde da população (GOUVEIA, 2013). O nível de poluição atmosférica é medido pela quantidade de substâncias poluentes presentes no ar. A variedade das substâncias que podem ser encontradas na atmosfera é muito grande, o que torna difícil a tarefa de estabelecer uma classificação. A interação entre as fontes de poluição e a atmosfera vai definir o nível de qualidade do ar, que determina por sua vez o surgimento de efeitos adversos da poluição do ar sobre os receptores, que podem ser o homem, os animais, as plantas e os materiais.

As condições meteorológicas também apresentam papel importante no comportamento dos poluentes atmosféricos. Eventos como neve e chuva são capazes de precipitar os poluentes em suspensão contribuindo no processo de remoção da atmosfera. O processo de remoção contribui para a deposição destes poluentes na superfície terrestre, seja no solo, vegetação ou corpos hídricos. Já os vapores de água condensados, que contêm aerossóis, se em contato com poluentes, pode contribuir para a formação de poluentes secundários. Este processo de transformação dos poluentes depende da temperatura atmosférica, umidade relativa, intensidade de radiação solar, da reatividade dos compostos envolvidos e muitas outras variáveis tanto meteorológicas quando físico-químicas dos poluentes e componentes da atmosfera (KOREN; BISESI, 2003).

A medição sistemática da qualidade do ar é restrita a um número de poluentes, definidos em razão de sua importância e dos recursos disponíveis para seu acompanhamento. O grupo de poluentes que servem como indicadores de qualidade do ar, adotados universalmente e que foram escolhidos em razão da frequência de ocorrência e de seus efeitos adversos, são: Material Particulado (MP), Partículas Totais em Suspensão (PTS), Partículas Inaláveis (MP₁₀), Partículas Inaláveis Finas (MP_{2,5}) e Fumaça (FMC). Sob a denominação geral de Material Particulado se encontra um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho (CETESB, 2023).

As partículas inaláveis (MP₁₀) podem ser definidas de maneira simplificada como aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 10 μ m. Dependendo da distribuição de tamanho na faixa de 0 a 10 μ m, podem ficar retidas na parte superior do sistema respiratório ou penetrar mais profundamente, alcançando os alvéolos pulmonares. O relatório anual da CETESB conta com informações de estações medidoras localizadas na região metropolitana de São Paulo, interior e litoral do estado. Merece atenção o município de Santa Gertrudes, onde as estações de monitoramento da qualidade do ar registram elevadas concentrações de partículas inaláveis (MP₁₀).

Miri *et al.* (2017) mostraram, usando o software AirQ 2.2.3 para modelar a relação entre a exposição de curto prazo a PM₁₀ e os casos de doenças propostos pela Organização Mundial da Saúde (OMS), que 10,21% da mortalidade respiratória estavam relacionados às concentrações de MP₁₀.

O polo cerâmico de Santa Gertrudes destaca-se pela concentração da atividade ceramista de fabricação de pisos de revestimento a partir da argila, sendo responsável por uma parcela considerável da produção nacional de piso cerâmico. Esse polo engloba os municípios de Santa Gertrudes, Cordeirópolis, Rio Claro, Ipeúna, Itacemópolis, Limeira e Piracicaba. Nesse polo, as atividades de extração, beneficiamento e transporte de matéria prima constituem-se nas principais fontes de emissão de material particulado (MP), notadamente por emissões fugitivas, e a concentração da atividade nos municípios faz com que os impactos na qualidade do ar sejam significativos. Segundo a Associação Paulista das Cerâmicas de Revestimento - ASPACER (2016) o polo cerâmico de Santa Gertrudes é o maior polo cerâmico das Américas em produção e o segundo maior do mundo.

O entorno do polo cerâmico de Santa Gertrudes é rodeado por áreas residenciais, escolas, estabelecimentos comerciais, unidades de saúde, entre outros, de maneira que existem diversos indivíduos expostos às emissões do polo. Há vários trabalhos publicados, como, por exemplo, o de Sobral (1988), relativo aos efeitos da poluição do ar na manifestação das doenças respiratórias em crianças da grande São Paulo, e os de Pitton e Domingos (2004), que relacionaram os tipos de tempo e as crises hipertensivas de moradores de Santa Gertrudes, mostra a ação dos fatores climáticos na fisiologia do ser humano, produzindo doenças respiratórias.

Saldiva *et al.* (1994) vêm demonstrando, através de estudos, os efeitos da liberação dos poluentes na atmosfera, tanto no aparecimento de doenças cardiovasculares, respiratórias, como no agravamento delas. Segundo Saldiva (2010, entrevistado por CAMPOLIM e DINIZ, 2010, p. 1): “Sabemos hoje que, depois de um dia de alta concentração de poluentes, o número de óbitos por doenças cardiovasculares na cidade de São Paulo aumenta de 10% a 12%.”

Neste sentido, sabendo que as atividades industriais têm grande potencial de emissão de poluentes atmosféricos, pode-se perceber que a área de influência do polo cerâmico de Santa Gertrudes merece especial atenção, uma vez que as inúmeras atividades industriais que lá são realizadas por muitos anos podem contribuir com deterioração da qualidade do ar local e o agravamento à saúde da população local.

Nos últimos anos, as doenças respiratórias têm atingido fortemente a população brasileira, só no ano 2013, aproximadamente 1 milhão de internações foram registradas pelo SUS, provocando cerca de 140 mil óbitos e trazendo um custo de mais de R\$ 950 milhões ao país (DATASUS, 2015).

Neste estudo propõem-se estudar a relação da exposição a poluentes do ar nos óbitos por doenças respiratórias no município de Santa Gertrudes. Dentre as doenças respiratórias existentes, temos a COVID-19, doença que provocou uma pandemia nos últimos anos e que levou milhões de pessoas a óbito devido a complicações dessa síndrome respiratória causada por coronavírus.

O objetivo deste trabalho é verificar o relacionamento entre óbitos de pacientes internados com diagnóstico principal de doença respiratória e material particulado na cidade de Santa Gertrudes, no período de 2020 a 2023, utilizando modelos lineares generalizados.

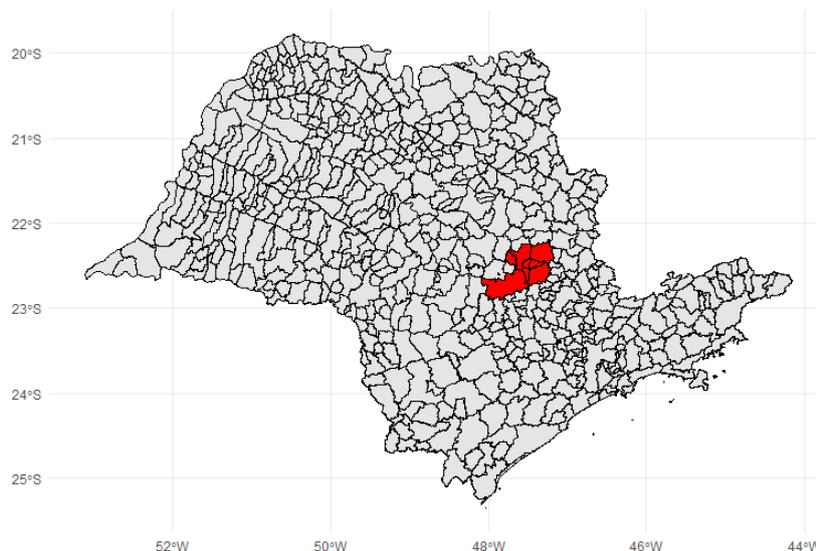
Material e Métodos

Região de inquérito da pesquisa

O Polo Cerâmico de Santa Gertrudes destaca-se como uma região proeminente na indústria cerâmica do Brasil e engloba cidades que são pilares da produção e distribuição cerâmica. Santa Gertrudes, a cidade central e que empresta seu nome ao polo, é apenas uma das várias que compõem essa importante área econômica. Além dela, temos municípios como Rio Claro, Cordeirópolis, Piracicaba, Itacemópolis, Ipeúna, Araras e Limeira, todos contribuindo de maneira significativa para a dinâmica cerâmica da região.

Situado estrategicamente no estado de São Paulo, o Polo Cerâmico de Santa Gertrudes não é apenas um ponto de referência na indústria cerâmica brasileira, mas também um pilar de influência no panorama econômico estadual. A Figura 1 destaca essa influência, marcando o polo em vermelho em um mapa do estado, ressaltando sua posição central e sua significativa contribuição para a economia paulista.

Figure 1: Location of the Santa Gertrudes ceramic pole in the state of São Paulo.



Source: Map created with *software* R using the *ggplot2* package.

Obtenção e tratamento dos dados

Para o cenário delimitado no estudo selecionaram-se dados públicos provenientes dos órgãos de pesquisa governamentais Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS).

Buscou-se no sistema DATASUS informações referentes aos óbitos e internações por doenças respiratórias no período delimitado. O acesso a esses dados deu-se diretamente pelo *site* do DATASUS (<http://datasus.saude.gov.br/>), sendo selecionada a opção de menu “Acesso à Informação” e posteriormente as opções “Serviços” e “Transferência de Arquivos”. Selecionou-se então a opção SIHSUS (Sistema de Informações Hospitalares do Sistema Único de Saúde), e como opções para download dos arquivos a modalidade “dados”; tipo de arquivo “SD – AIH Reduzida”; anos de 2020 a 2023; UF (Unidade Federal) “SP” (São Paulo) e meses de janeiro a dezembro. Os dados disponibilizados pelo portal possuem a extensão “.dbc” ou “Database Compression”, sendo necessária a expansão pelo programa Tabwin, disponibilizado no próprio sítio do DATASUS. Como resultado da descompressão, tem-se arquivos com extensão “.dbf” ou “Database File” acessíveis por aplicativos de banco de dados e gerenciadores de planilhas eletrônicas.

A tabela histórica de internações e óbitos foi populada somente com dados do município de Santa Gertrudes, sendo esses tratados para que na tabela DATASUS fossem apresentados somente os atributos necessários para esta pesquisa, filtrados no diagnóstico principal pelos códigos de CID 10 de J00 até J99 (doenças do aparelho respiratório) e de B32.4 (infecção por coronavírus de localização não especificada). Os atributos selecionados foram: Ano, Mês, Município de residência, Data da internação, Diagnóstico principal, Dias de Permanência e Óbitos.

A extração dos dados da CETESB se deu por acesso ao site da companhia no endereço <https://cetesb.sp.gov.br/>, selecionando-se a seguir, na opção de menu, “Ar” e o sistema de qualidade do ar “QUALAR”. Para o acesso aos dados do sistema, é necessário realizar um cadastro no próprio site. Após o acesso, utilizou-se a opção de menu “CONSULTAS”, subitem “Exportar dados avançados”. Selecionou-se o período do estudo, a estação (o município) e os parâmetros de interesse. O sistema limita a escolha de três parâmetros por vez, neste trabalho foram escolhidos: MP₁₀, Umidade Relativa (UR) e Velocidade do Vento (VV). Optou-se por não utilizar o parâmetro Temperatura pois em Silva *et al.* (2024) verificou-se que a correlação entre a Temperatura e MP₁₀ é baixa.

A planilha bruta mostra os dados horários (1h - 24h) de todos os dias do ano em estudo. O tratamento das planilhas deu-se em calcular a média do dia para cada um dos parâmetros em cada ano.

Extraídos os dados, iniciou-se a aplicação dos tratamentos necessários para o alcance dos objetivos, selecionando-se apenas os grupos delimitados para o presente estudo. Na análise das planilhas, identificamos a presença de valores ausentes, representados como NA, em ambas as bases de dados, a de saúde e a do ar. Na planilha de saúde, os NA's surgiram em algumas colunas. Este fenômeno ocorreu porque, nos dias sem internação, naturalmente não há um diagnóstico principal registrado, refletindo a ausência de eventos de saúde para aquele período. Em contrapartida, na planilha de dados do ar, os valores NA são resultantes de lacunas nos registros brutos fornecidos pela estação meteorológica. Isso indica que, em determinados momentos, a estação não coletou ou não disponibilizou medidas horárias específicas. Estas particularidades ressaltam a necessidade de abordagens diferenciadas para o tratamento e análise desses dados, assegurando interpretações precisas e isentas de vieses decorrentes de informações faltantes. Desenvolveu-se como resultado dessa etapa uma base de dados históricos de poluentes e de internações e óbitos, de modo a possibilitar posterior cruzamento das informações.

Análises estatísticas

Dividiu-se a análise estatística realizada nessa pesquisa em duas partes: análise descritiva e análise de regressão utilizando a metodologia de modelos lineares generalizados.

Na análise descritiva buscou-se explorar cada variável do estudo separadamente ou conjuntamente com o MP₁₀ por meio de gráficos de dispersão, box-plots, tabela com as medidas de resumo e tabela de distribuição de frequência.

Para trabalhar com os dados diários de mortalidade por doenças do aparelho respiratório (DAR) e da concentração estimada de MP₁₀ foram utilizados modelos lineares generalizados (MLGs) com regressão Binomial e para os dados de quantidade de dias de permanência no hospital e da concentração estimada de MP₁₀ foram utilizados modelos lineares generalizados (MLGs) com regressão de Poisson.

Os MLGs podem ser usados quando se tem uma única variável aleatória Y associada a um conjunto de variáveis explanatórias x_1, \dots, x_p . Para uma amostra de n observações (y_i, x_i) , em que $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})^T$ é o vetor coluna de variáveis explanatórias, o MLG envolve os três componentes:

i) Componente aleatório

Representado por um conjunto de variáveis aleatórias Y_1, \dots, Y_n obtidas de uma mesma distribuição que faz parte da família exponencial com médias μ_1, \dots, μ_n , ou seja, $E(Y_i) = \mu_i$, $i = 1, \dots, n$, sendo $\phi > 0$ um parâmetro de dispersão e θ_i o parâmetro denominado canônico. Então a função densidade ou de probabilidade de Y_i é expressa por

$$f(y_i; \theta_i, \phi) = \exp\{\phi^{-1}[y\theta_i - b(\theta_i)] + c(y_i, \phi)\},$$

em que $b(\cdot)$ e $c(\cdot)$ são funções conhecidas.

$$E(Y_i) = \mu_i = b'(\theta_i)$$

e

$$Var(Y_i) = \phi b''(\theta_i) = \phi V_i$$

em que $V_i = V(\mu_i) = \frac{d\mu_i}{d\theta_i}$ é denominada de função de variância que depende exclusivamente da média μ_i .

ii) Componente sistemático

As variáveis explanatórias entram na forma de uma soma linear de seus efeitos

$$\eta_i = \mathbf{X}\beta$$

sendo $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n)^T$ a matriz do modelo, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)^T$ o vetor de parâmetros desconhecidos e $\eta = (\eta_1, \dots, \eta_n)^T$ o preditor linear. Se um parâmetro tem valor conhecido, o termo correspondente na estrutura linear é chamado *offset*.

iii) Função de Ligação

Uma função que relaciona o componente aleatório ao componente sistemático, ou seja, vincula a média ao preditor linear, isto é,

$$\eta_i = g(\mu_i)$$

sendo $g(\cdot)$ uma função monótona e diferenciável.

Se uma função de ligação é escolhida de modo que $g(\mu_i) = \theta_i = \eta_i$, o preditor linear modela diretamente o parâmetro canônico θ_i , sendo denominada função de ligação canônica. Os modelos correspondentes são denominados canônicos (CORDEIRO; DEMÉTRIO, 2010).

A seleção dos melhores modelos será feita pela avaliação dos valores de Akaike (AIC) e a Deviance. Para as análises estatísticas foi utilizado o *software* R, versão 3.4 (R CORE TEAM, 2021).

Resultados e discussão

Apresentamos na Tabela 1 as principais medidas descritivas para três variáveis coletadas na plataforma QUALAR durante o período de estudo: Material Particulado (MP₁₀), Umidade Relativa do ar (UR) e Velocidade do Vento (VV). Essas medidas proporcionam uma visão resumida das características centrais e da dispersão dessas variáveis.

Table 1: Descriptive measures for the variables particulate matter (MP₁₀), relative humidity (UR) and wind speed (VV).

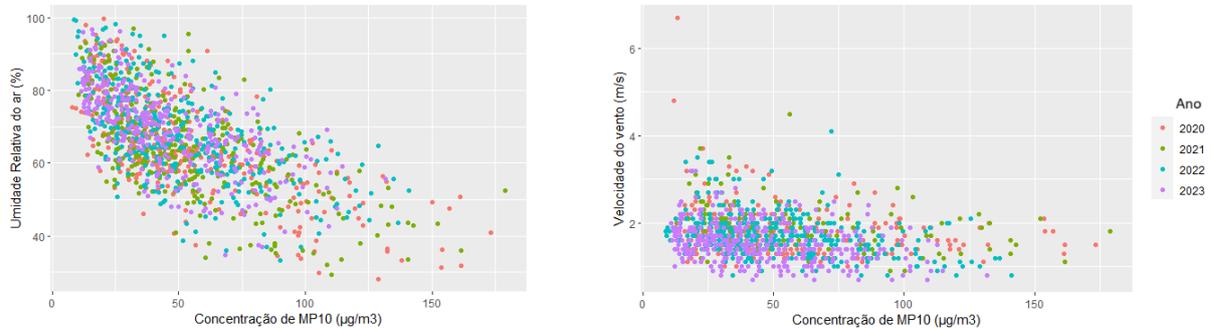
Variável	Mínimo	Mediana	Média	Máximo	NAs
MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8,0	43,7	50,2	178,8	39
UR (%)	28,2	66,8	67,0	99,7	49
VV (m/s)	0,7	1,7	1,7	6,7	411

Source: from authors (2024).

Observe que a variável MP₁₀ possui média de 50,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor acima do índice considerado bom (0 a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). O valor máximo, 178 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ já pertencendo a estrutura do índice de qualidade do ar considerado ruim (100 a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A variável UR apresentou média e mediana próximas, indicando que a distribuição do dados é simétrica, o mesmo ocorre com a Velocidade do Vento. Podemos observar também que a variável VV apresenta muitos valores ausentes, podendo não informar com precisão a relação com as demais variáveis.

Analisamos por meio da Figura 2 a relação entre as variáveis Umidade Relativa do Ar e Velocidade do Vento com a Concentração de MP_{10} . Estes gráficos permitem visualizar como as variações na umidade e do vento estão relacionadas às mudanças na concentração de partículas no ar.

Figure 2: Graphs illustrating the relationship between relative humidity, wind speed, and MP_{10} concentration.

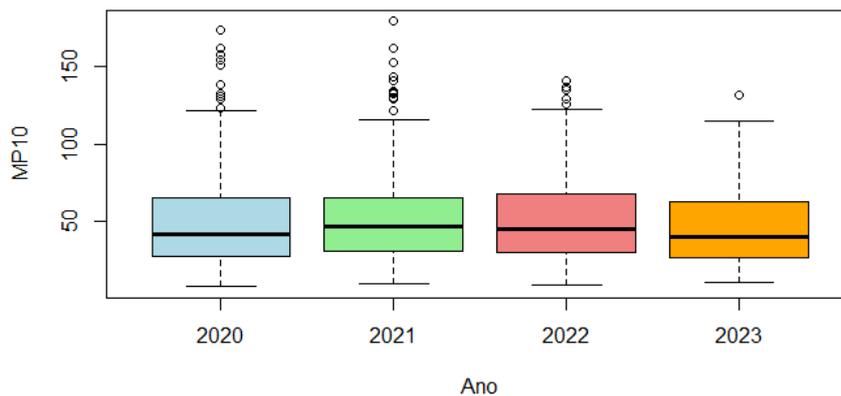


Source: from authors (2024).

Observe na Figura 2(a) que a UR tem uma relação inversamente proporcional com a concentração de MP_{10} , ou seja, quanto mais alta a UR mais baixa a concentração de MP_{10} . Na Figura 2(b) podemos perceber que a velocidade do vento nesses três anos de estudo permaneceu na maioria dos dias em uma faixa de 1 a 3 m/s e que a concentração de MP_{10} não tem muita influência com a VV.

Na Figura 3 podemos ver que as distribuições da concentração de MP_{10} nos três anos são notavelmente semelhantes. Todas exibem características consistentes, sugerindo uma certa uniformidade nas tendências observadas ao longo desse período temporal.

Figure 3: Boxplots of the variable MP_{10} for each year.

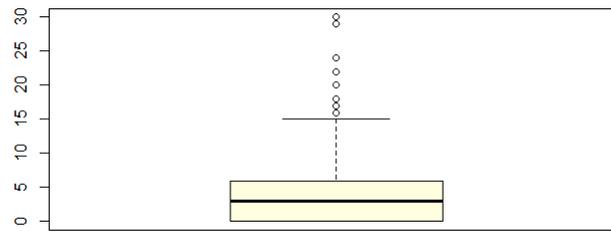


Source: from authors (2024).

A presença de valores discrepantes acima da mediana destaca a ocorrência de eventos atípicos que merecem atenção especial. Esses valores elevados podem indicar episódios pontuais de poluição ou condições ambientais excepcionais que resultaram em concentrações anormalmente altas de material particulado.

Quando analisamos a variável “Dias de Permanência Internado” por meio do boxplot (Figura 4), observamos que a mediana se situa em torno de 4 dias, indicando que metade das observações está concentrada nessa faixa temporal. No entanto, a presença de valores discrepantes acima da mediana destaca a existência de casos com permanência hospitalar excepcionalmente

Figure 4: Boxplot of the variable days in hospital.



Source: from authors (2024).

prolongada.

Em seguida, apresentamos uma tabela (Tabela 2) que resume o número total de internações em cada ano na cidade de Santa Gertrudes, juntamente com o número de óbitos associados a essas internações.

Table 2: Hospitalizations and deaths.

Ano	Internações totais	Número de óbitos
2020	103	11
2021	144	15
2022	82	4
2023	83	5

Source: from authors (2024).

A análise dos dados sugere que a pandemia teve uma influência significativa nos anos de 2020 e 2021 em Santa Gertrudes. O aumento expressivo no número total de internações e óbitos em 2020 pode ser atribuído aos impactos iniciais da pandemia da COVID-19, refletindo desafios de saúde pública e a necessidade de respostas emergenciais.

Conduziu-se uma análise estatística empregando a técnica de Modelos Lineares Generalizados. A fim de explorar a relação entre óbitos e variáveis ambientais (MP_{10} , VV e UR), optou-se pela aplicação da regressão logística. A escolha por esta técnica se justifica pela natureza binária da variável “Morte”, que assume valores 0 e 1, representando, respectivamente, não ocorreu óbito e ocorreu óbito. Para enriquecer o modelo, incorporaram-se lags de 1 até 7 como variáveis explanatórias. O estabelecimento do lag máximo (MP_{10} lag = 7) baseou-se em estudos anteriores e na análise de sensibilidade realizada por Mendrot (2022). A comparação foi conduzida entre os modelos utilizando três diferentes funções de ligação: Logito, Probit e Complemento Log-Log.

Os resultados obtidos indicaram que, nas três opções analisadas, o MP_{10} foi a única variável estatisticamente significativa, apresentando um valor de p inferior a $\alpha = 10\%$.

Diante desse contexto, a decisão foi tomada de aprimorar o modelo, incorporando lags de 1 a 7 à variável MP_{10} . Esse aperfeiçoamento visa capturar possíveis efeitos temporais que possam influenciar a relação entre as variáveis analisadas.

O modelo testado para as três funções de ligação previamente utilizadas foi formulado da seguinte maneira:

$$\text{Morte} = \beta_0 + \beta_1 MP_{10} + \beta_2 MP_{10} \text{lag}_1 + \beta_3 MP_{10} \text{lag}_2 + \dots + \beta_8 VV.$$

Nas três opções avaliadas, observou-se que a variável $MP_{10} \text{lag}_4$ foi estatisticamente significativa a um nível de 5%. Esse resultado indica que o a inclusão do valor retardado (lag) de 4 dias da variável MP_{10} contribuiu de maneira estatisticamente significativa para explicar as variações nos casos de morte por doenças respiratórias.

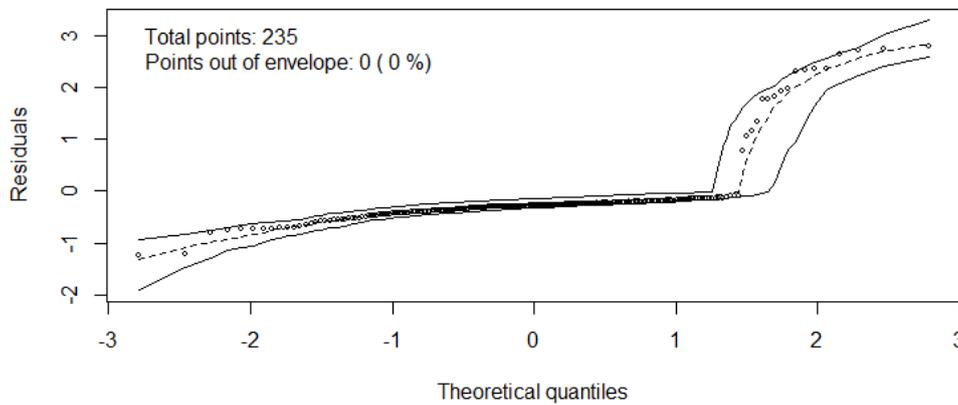
Ao analisar o desempenho das diferentes funções de ligação, o modelo logístico com a função complemento log-log destacou-se, apresentando o menor AIC (Critério de Informação de Akaike) e a menor deviance, conforme evidenciado na Tabela 3. Além disso, a Figura 5 ilustra o gráfico hnp (halph normal plot) do modelo logístico com a função de ligação complemento log-log, em que todos os pontos estão dentro dos limites esperados, indicando que os resíduos do modelo seguem uma distribuição normal.

Table 3: Comparison of models with different link functions.

Função de Ligação	AIC	Deviance
Probit	126,37	104,37
Logito	125,76	103,76
Complemento Log Log	125,32	103,32

Source: from authors (2024).

Figure 5: HNP graph of the logistic model with Log-Log complementary link function.



Source: from authors (2024).

Logo, o modelo final foi dado por

$$\text{Morte} = -3,92 + 0,02\text{MP}_{10}\text{lag}_4.$$

Continuando a análise de dados em Santa Gertrudes, empregou-se o modelo linear generalizado com distribuição de Poisson para examinar a influência das variáveis MP_{10} , UR e VV sobre a variável “Dias de Permanência Internado”, cujo diagnóstico principal foi relacionado a doenças respiratórias.

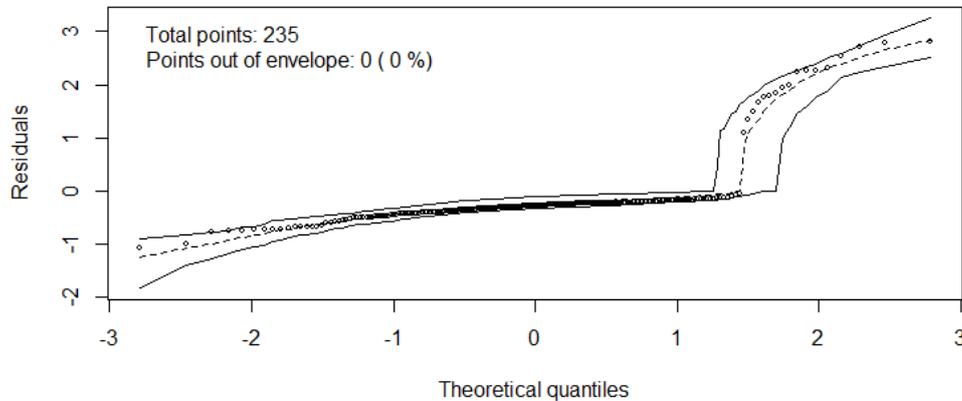
Os resultados do modelo revelaram significância estatística a um nível de 5% para todas as três variáveis explicativas. Com o intuito de capturar possíveis efeitos defasados ao longo do tempo, optou-se por incorporar lags de 1 a 7 da variável MP_{10} no modelo, utilizando a função de ligação canônica logarítmica. O modelo ajustado foi formulado da seguinte maneira:

$$\text{Dias de permanência} = \beta_0 + \beta_1\text{MP}_{10} + \beta_2\text{MP}_{10}\text{lag}_1 + \beta_3\text{MP}_{10}\text{lag}_2 + \dots + \beta_8\text{VV}.$$

Os resultados indicaram que $\text{MP}_{10}\text{lag}_3$, $\text{MP}_{10}\text{lag}_4$, $\text{MP}_{10}\text{lag}_5$, UR e VV foram estatisticamente significativas, sugerindo que essas variáveis desempenham um papel relevante na explicação da variabilidade observada em relação aos dias de permanência internado com diagnóstico principal relacionado a doenças respiratórias. Esse resultado corrobora com um dos resultados de Mendrot (2022), que observou uma associação entre a exposição ao MP_{10} e as internações por doenças cardiovasculares no intervalo de três dias (lag_3) por meio dos meio

da Regressão de Poisson. Pode-se notar também que por meio da Figura 6 os resíduos são normalmente distribuídos.

Figure 6: HNP graph of MLG with Poisson distribution and logarithmic link function.



Source: from authors (2024).

O modelo final foi dado por:

Dias de permanência = $0,37 - 0,01MP_{10}lag_3 + 0,02MP_{10}lag_3 - 0,01MP_{10}lag_5 + 0,01UR + 0,23VV$.

Considerações Finais

Os resultados obtidos revelam uma clara associação entre a concentração de MP_{10} e a umidade relativa do ar (UR), indicando uma relação inversamente proporcional. Além disso, a análise temporal dos anos de 2020 e 2021 destaca um aumento significativo no número de internações e óbitos, refletindo diretamente o agravamento da situação de saúde pública devido ao pico da pandemia nesse período.

A modelagem revelou como a relação entre os óbitos em Santa Gertrudes e a concentração de MP_{10} com um lag de 4 dias, sugerindo que as pessoas falecidas foram expostas ao poluente com uma defasagem temporal. No que diz respeito ao número de dias internados, observou-se uma relação complexa envolvendo MP_{10} com lags de 3, 4 e 5 dias, bem como a umidade relativa (UR) e velocidade do vento (VV). Esses achados indicam a influência multifatorial nos períodos de internação, envolvendo tanto a poluição atmosférica quanto as condições meteorológicas.

Portanto, as conclusões deste estudo contribuí para a compreensão dos impactos da qualidade do ar na saúde da população, especialmente em contextos de crises sanitárias como a pandemia de COVID-19. Essas descobertas destacam a importância de políticas públicas e ações preventivas para mitigar os efeitos adversos da poluição atmosférica, visando à proteção da saúde e bem-estar da comunidade.

References

ASSOCIAÇÃO PAULISTAS DAS CERÂMICAS DE REVESTIMENTO -ASPACER.
Disponível em: <https://www.aspacer.com.br/2016/06/01/polo-ceramico-de-santa-gertrudes-em-pauta/>.
2016. Acessado em: 10 de março de 2023.

CANÇADO, J. E. D. *et al.* *Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica*. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, v.32, n.Supl 1, p.S5-S11, 2006.

CESAR, G. C. A.; NASCIMENTO, C. F. L.; CARVALHO, A. J. *Associação entre exposição ao material particulado e internações por doenças respiratórias em crianças*. Revista de Saúde Pública, v.47, n.6, p.1209-12, 2013.

COELHO, S. Z. S. M. *Uma análise estatística com vistas a previsibilidade de internações por doenças respiratórias em função de condições meteoro trópicas na cidade de São Paulo*. 2007. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/>. Acessado em: 10 de março de 2023.

CORDEIRO, G. M.; DEMÉTRIO, C. G. B. *Modelos Lineares Generalizados e Extensões*. Disponível em: [https://docs.ufpr.br/\\$\sim\\$taconeli/CE225/Clarice.pdf](https://docs.ufpr.br/\simtaconeli/CE225/Clarice.pdf) (2010)

BRASIL. Ministério da Saúde. DATASUS: Departamento de Informática do SUS. Disponível em: <http://datasus.saude.gov.br/>. Acesso em: 9 dez. 2023. Brasília: Ministério da Saúde, 2023.

GONÇALVES, T. L. F. *et al. 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, v.28, p.109-19, 2010.

GOUVEIA, Nelson et al. *Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras*. Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília, v. 12, n. 1, p. 29-40, mar. 2003.

KOREN, H.; BISESI, M. *Gerenciamento da qualidade do ar*. In: Hand book of Environmental health: pollutant interaction in air, water, and soil. v. 2. ed. 4. Lewis Publishers, 2003. cap. 1. p. 1 – 84.

MARIO, M. P. J. *Poluição atmosférica como condicionante no processo de ocupação do espaço urbano: Análise na cidade de Porto Alegre, RS*. 2012. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Industrial) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

MENDROT, A. R. *Análise de impactos da poluição do ar na saúde humana: Estudo no Município de Taubaté/SP*. Tese de Doutorado, UNESP. 2022.

MIRI, M. *et al. Human health impact assessment of exposure to particulate matter: an AirQ software modeling* 2017. Environmental Science and Pollution Research, v. 24, p. 16513-16519.

PITTON, S. E. C.; DOMINGOS, A. E. *Tempo e doenças: efeitos dos parâmetros climáticos nas crises hipertensivas nos moradores de Santa Gertrudes (SP)*. Estudos geográficos: revista eletrônica de geografia, Rio Claro, v. 2, n. 1, p. 75-86, jun. 2004.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2012. ISBN 3-900051-07-0, <http://www.R-project.org/>.

RUSSO, P. R. *A qualidade do ar no município do Rio de Janeiro : análise espaço-temporal de partículas em suspensão na atmosfera*. Revista de Ciências Humanas, v.10, n.1, p.78-93, jan./jun. 2010.

SALDIVA, P. H. N. et al . *Association between air pollution and mortality due to respiratory diseases in children in São Paulo, Brazil: a preliminar report*. Environmental Research, San Diego, v. 65, n. 2, p. 218-225, 1994.

SALDIVA, P. H. N. et al. *Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles*. São Paulo: ExLibris, 2010.

SILVA, P. V. et al. *Análise da concentração de MP10 no município de Santa Gertrudes – SP no período de 2019 a 2022 em busca da gestão urbana sustentável*, 2024. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/sustentare-wipis-2023-311985/677141-ANALISE-DA-CONCENTRACAO-DE-MP10-NO-MUNICIPIO-DE-SANTA-GERTRUDES-SP-NO-PERODO-DE-2019-A-2022-EM-BUSCA-DA-GESTAO>.

SOBRAL, H. R. *Poluição do ar e doenças respiratórias em crianças da grande São Paulo: um estudo de geografia médica*. 190 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.