

ANÁLISE PRELIMINAR DA RELAÇÃO ENTRE A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E CASOS DE COVID-19 NA AMAZÔNIA OCIDENTAL: UM ESTUDO DE CASO NO ESTADO DE RONDÔNIA

PRELIMINARY ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN AIR POLLUTION AND CASES OF COVID-19 IN THE WESTERN AMAZON: A CASE STUDY IN THE STATE OF RONDÔNIA

Francisco Ivam Castro do Nascimento

Universidade Federal de Rondônia, RO, Brasil
ivam.nc@gmail.com

Adriana Cristina da Silva Nunes

Universidade Federal de Rondônia, RO, Brasil
adriananunes@unir.br

João Paulo Assis Gobo

Universidade Federal de Rondônia, RO, Brasil
joao.gobo@unir.br

RESUMO

Estudos recentes têm apontado para a associação positiva entre a Covid-19 e variáveis de poluição do ar. Entretanto, inexistem pesquisas no Brasil que tenham utilizado o conjunto de variáveis ambientais abordadas nesta pesquisa, bem como os métodos empregados de análise espacial. O objetivo deste artigo foi avaliar a associação entre os poluentes monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), ozônio (O₃) e Dióxido de Nitrogênio (NO₂) com a taxa de casos e óbitos por Covid-19 no Estado de Rondônia entre os anos de 2020 e 2021. Para isso, foi aplicado o coeficiente de correlação de Pearson e o teste de regressão dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS). A correlação de Pearson apontou para correlação muito fraca, fraca e moderada entre a taxa de casos e óbitos por Covid-19 e as variáveis de poluição do ar com p-valor > 0,05. Os testes de Koenker (BP) e Jarque-Bera da OLS confirmaram a inexistência de associação espacial. Com isso, as evidências não indicam haver associação entre o CO, SO₂, O₃ e NO₂ com a taxa de casos e óbitos por Covid-19 em Rondônia no período analisado.

Palavras-chave: Covid-19. Poluição do ar. Análise espacial.

ABSTRACT

Recent papers have pointed to a positive association between Covid-19 and air pollution variables. However, there is no research in Brazil that has used the set of environmental variables addressed in this research, as well as the methods employed for spatial analysis. The objective of this paper was to evaluate the association between carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO₂), ozone (O₃), and nitrogen dioxide (NO₂) pollutants with the rate of cases and deaths from Covid-19 in the state of Rondônia between the years 2020 and 2021. For this, Pearson's correlation coefficient and the Ordinary Least Squares (OLS) regression test were applied. Pearson's correlation pointed to very weak, weak, and moderate correlation between the rate of cases and deaths from Covid-19 and the air pollution variables with p-value > 0.05. The OLS Koenker (BP) and Jarque-Bera tests confirmed the non-existence of spatial association. With this, the evidence indicates no association between CO, SO₂, O₃ and NO₂ with the rate of cases and deaths from Covid-19 in Rondônia in the analyzed period.

Keywords: Covid-19. Air pollution. Spatial analysis.

Recebido em: 15/06/2023.

Aceito para publicação em: 24/11/2023.

INTRODUÇÃO

Cerca de 91% da população mundial vive em lugares onde a qualidade do ar é considerada abaixo dos limites permitidos (WHO, 2016). As consequências da degradação do ar são manifestadas nas grandes porcentagens de mortalidade em todo mundo (MONSERRATE; RUANO; ALCADE, 2020). A poluição do ar também pode contribuir com o aumento da vulnerabilidade aos efeitos da Covid-19 (CONTINI; COSTABILE, 2020).

A exposição a diferentes poluentes do ar está associada ao aumento de sintomas respiratórios e diminuição da função pulmonar. Estes problemas causam, com relativa frequência, aumento da demanda por serviços hospitalares (KO e HUI, 2012). Pelo fato de ser causado por um vírus respiratório, espera-se que o novo coronavírus, uma espécie de vírus da família dos coronavírus, que causa a doença Covid-19 também seja influenciada pela poluição do ar, seja no aumento da transmissibilidade ou na ocorrência de casos graves, principalmente em certos períodos do ano.

Estudos sobre a qualidade do ar têm encontrado evidências de que a poluição atmosférica, tem sido associada ao aumento de mortalidade por doenças respiratórias (BATESON e SCHWARTZ, 2008; RODRIGUES; IGNOTTI; HACON, 2013). Associado a isso, tem-se indicado a influência de variáveis como monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), ozônio (O₃), monóxido de nitrogênio (NO) e Dióxido de Nitrogênio (NO₂) ao maior número de casos e mortes por Covid-19 (HASSAN et al., 2021; CAHYADI et al., 2022).

No Brasil dados do Ministério da Saúde evidenciaram a região Norte como aquela com as maiores taxas de incidência de Covid-19 no país. Nesse cenário, Rondônia se destacou com número de casos superiores aos registrados em outros estados do país. Além disso, destaca-se que Rondônia concentrou em 2020 e 2021 as maiores taxas de poluentes suspensos no ar, principalmente os relacionados à queimada da biomassa por atividades antropogênicas. Machado Silva (2020) destaca que a exposição ao material particulado está associada ao aumento do número de hospitalizações por doenças respiratórias.

Embora este tema tenha sido pauta de diversos estudos, envolvendo uma série de poluentes do ar, nenhum estudo focou na região amazônica, que possui alguns dos estados mais afetados pela Covid-19 no país, sendo possível identificar apenas os estudos de Leirião, Debone e Miraglia (2022), onde correlacionaram variáveis ambientais com a Covid-19 no Brasil.

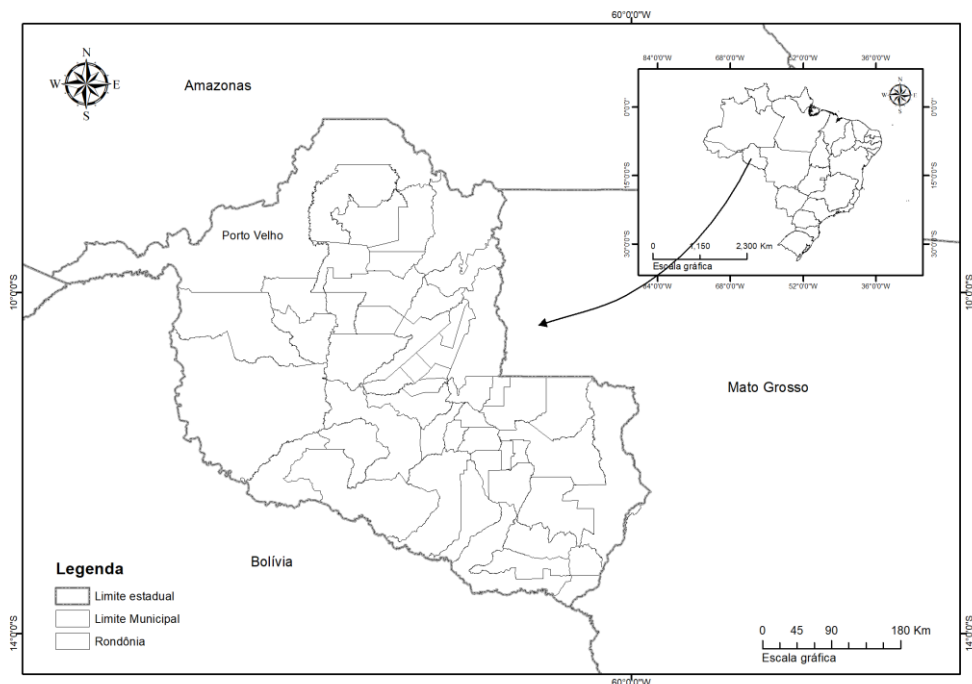
Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a correlação espacial dos poluentes atmosféricos (SO₂, O₃, CO e NO₂) com a taxa de casos e mortalidade por Covid-19 no estado de Rondônia em 2020 e 2021. Nesse período, Rondônia chegou a registrar a terceira maior taxa de mortalidade pela doença no Brasil com 413,7 mortes a cada 100 mil habitantes.

Em 2020 foram registrados 97.124 casos confirmados de Covid-19 em Rondônia. Em 2021, 188.294 casos e em 2022, 187.582 casos. Em 2020 foram registrados 1.824 óbitos, em 2021, 4.888 óbitos e em 2022 cerca de 692 óbitos (BRASIL, 2023). O elevado número de casos e de óbitos em relação ao registrado em outras regiões do país e as elevadas taxas de poluição do ar, torna Rondônia um caso especial frente ao cenário regional e nacional, fato que motivou a realização desta pesquisa.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estado de Rondônia pode ser localizado entre a latitude 10°S e longitude 60° W. Possui uma área de aproximadamente 237.765,3 km². Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Rondônia possuía em 2021 uma população estimada de 1.815.278 pessoas (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Variáveis e correlação estatística

A análise da correlação da qualidade do ar com casos e mortalidade por Covid-19 foi analisada pela primeira vez a partir de poluentes atmosféricos como PM 2.5 e PM 10. (GIANGRECO, 2020). A ideia era de que a maior emissão de poluentes do ar tivesse relacionado ao maior risco de crescimento das complicações por Covid-19 (KHAN, 2022).

Os registros de casos e mortes por Covid-19 foram extraídos a partir do repositório de dados públicos do governo federal <https://covid.saude.gov.br/> (BRASIL, 2021), sendo organizados por semana epidemiológica entre março de 2020 e dezembro de 2021. Estes dados são organizados e sistematizados a partir de informações fornecidas pelas secretarias de saúde dos estados.

Os dados de poluição do Ar, medidos a partir dos níveis de CO, NO₂, O₃ e SO₂ na troposfera foram obtidos por meio de imagens com resolução espacial de 1113.2 metros geradas pelo sensor TROPOMI do satélite Sentinel-5P, adquiridas e processadas por meio de scripts implementados no *Google Earth Engine* (GEE), resultando em valores por semana epidemiológica de concentração média em mol/m² para todo o estado de Rondônia nos anos de 2020 e 2021.

O Sentinel-5 Precursor é um satélite polar de órbita baixa mantido pela Agência Espacial Europeia (ESA), onde fornece informações da qualidade do ar, condições climáticas e ozônio. As informações de qualidade do ar, geradas por este satélite, incluem: O₃, NO₂, SO₂, CO, CH₄, CH₂O, e propriedades dos aerossóis. O principal objetivo da missão Sentinel 5P são as observações e monitoramento da qualidade do ar, ozônio e radiação UV superficial, bem como medições da composição atmosférica (VEEFKIND, et al., 2012). A boa relação sinal-ruído do Sentinel-5P permite a aquisição de dados em ambientes com pouca luz (VOORS, et al., 2012). O Instrumento de Monitoramento Troposférico (TROPOMI), é um instrumento que consegue medir as concentrações de gases residuais porque estes gases possuem assinaturas espectrais específicas no espectro eletromagnético. Nesse sentido, o sensor TROPOMI são adquiridas mede no topo da atmosfera (TOA), a radiação solar refletida e irradiação pela superfície terrestre, sendo um sensor que utiliza técnicas passivas de sensoriamento remoto.

A densidade de coluna vertical para o Dióxido de Enxofre (SO₂) foi calculada pela técnica DOAS (Espectroscopia de Absorção Óptica Diferencial). Os valores mínimos podem chegar a -0.4051 mol/m² e máximo 0.2079 mol/m². O dióxido de enxofre entra na atmosfera terrestre a partir de processos

naturais e antrópicos. Aproximadamente 30% do SO₂ é proveniente de fontes naturais. A grande parte desse gás presente na troposfera é de origem antropogênica.

O monóxido de carbono (CO) é um importante gás atmosférico. Em áreas urbanas, o CO é formado pela combustão incompleta de combustíveis contendo carbono (LOPEZ-COTO et al., 2022). Na Amazônia, a presença de CO nas camadas inferiores da atmosfera sofre influência das atividades antrópicas, com destaque para as queimadas. A densidade de coluna vertical para o CO varia de -34,4 a 5,71 mol/m². O Ozônio (O₃) encontrado próximo ao solo, é considerado um poluente (YAMAMOTO; REBOITA; CORRÊA, 2021), podendo contribuir com o agravamento de doenças respiratórias, além de ocasionar a diminuição da função pulmonar (YAMAMOTO; REBOITA; CORRÊA, 2021; NUVOLONE et al., 2018; LIPPMANN, 1989). Os valores de O₃ medidos pelo sensor TROPOMI variam de 0.025 mol/m² a 0.30048 mol/m².

Os valores registrados pelo sensor TROPOMI de dióxido de nitrogênio (NO₂) podem variar de -0.00051 mol/m² para valores baixos desse gás e 0.0192 mol/m² para valores elevados. Este poluente possui capacidade de agravamento de quadros de cardiopatia e inflamação das vias aéreas, além de possuir potencial cancerígeno (OLIVEIRA et al., 2017). Os óxidos de nitrogênio (NO₂ e NO) são gases importantes presentes tanto na troposfera quanto na estratosfera. Estes gases entram na atmosfera terrestre por meio de atividades antropogênicas (queima de combustíveis fósseis e biomassa) e por processos naturais (raios, incêndios e processos microbiológicos presentes nos solos).

Os dados de poluentes foram correlacionados com a taxa de casos e óbitos por Covid-19 utilizando-se o Coeficiente de correlação de Pearson, representado por ρ , podendo assumir apenas valores entre -1 e 1. Valores iguais a 0 (zero) indicam não haver correlação entre as variáveis (PARANHOS, 2014). Para esta pesquisa os casos e óbitos totais por Covid-19 foram transformados em taxa por 100 mil habitantes, deixando estes dados proporcionais ao tamanho da população. O cálculo das taxas de casos e mortalidade por Covid-19 levou em consideração a seguinte fórmula (1):

$$T = \frac{V}{P} \times 100.000 \quad (1)$$

Onde:

T = Taxa por 100 mil/hab;

V = variável analisada (Casos ou óbitos por Covid-19);

P = População estadual ou municipal.

O coeficiente de Pearson foi obtido por meio do software R, a partir da biblioteca *corrplot*, sendo expresso pela fórmula (2):

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (2)$$

Onde:

X_i e Y_i são os valores das variáveis X e Y. \bar{x} e \bar{y} são respectivamente as médias dos valores X_i e Y_i.

Existem divergências quanto a interpretação dos resultados do coeficiente de Pearson. Cohen (1988), considera pequenos os valores entre 0.10 e 0.29, valores médios estão entre 0.30 e 0.49 e valores altos entre 0.50 e 1. Para Dancey e Reidy (2005), valores entre 0.10 e 0.30 são considerados fracos, entre 0.40 até 0.60 moderado e acima de 0.70 forte. Por isso, foi decidido dividir o coeficiente de Pearson em cinco classes de interpretação, variando de 0.01 a 0.19 para correlações fracas até 0,90 a 1 para correlações muito forte, a fim de facilitar a interpretação dos resultados (Quadro 1).

Quadro 1 – Classes de interpretação do coeficiente de Pearson

Valor de ρ (+ ou -)	Interpretação
0.01 a 0.19	Correlação muito fraca
0.20 a 0.39	Correlação fraca
0.40 a 0.69	Correlação moderada
0.70 a 0.89	Correlação forte
0.90 a 1.00	Correlação muito forte

Elaborado pelo autor, 2022.

Teste de regressão pelo método OLS

Foi aplicado o teste de regressão dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) para verificar se a taxa de casos e mortes por Covid-19 em 2020 e 2021 foi influenciada pelas variáveis ambientais analisadas. A equação de regressão busca prevê o comportamento da variável dependente em relação a um conjunto de variáveis independentes. Cada variável independente está associada a um coeficiente de regressão, que descreve a força, o sinal e a relação dessa variável com a variável dependente analisada (3).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (3)$$

Onde:

Y = Variável dependente

$\beta_0 + \beta_1$ e β_2 = Coeficientes

X_1 e X_2 = Variáveis explanatórias/independentes

E = Resíduos

Para a realização deste teste foram extraídos a taxa de casos, taxa de mortes por Covid-19 e variáveis de poluição do ar para os 52 municípios do Estado de Rondônia nos anos de 2020 e 2021, afim de submeter estas informações a testes de correlação espacial. O teste OLS, do software ArcGIS pode estimar os parâmetros desconhecidos de um modelo de regressão linear. Trata-se de um método que minimiza a soma dos quadrados das distâncias verticais entre os valores que foram observados e os previstos pelo modelo linear (MIRANDA, 2015).

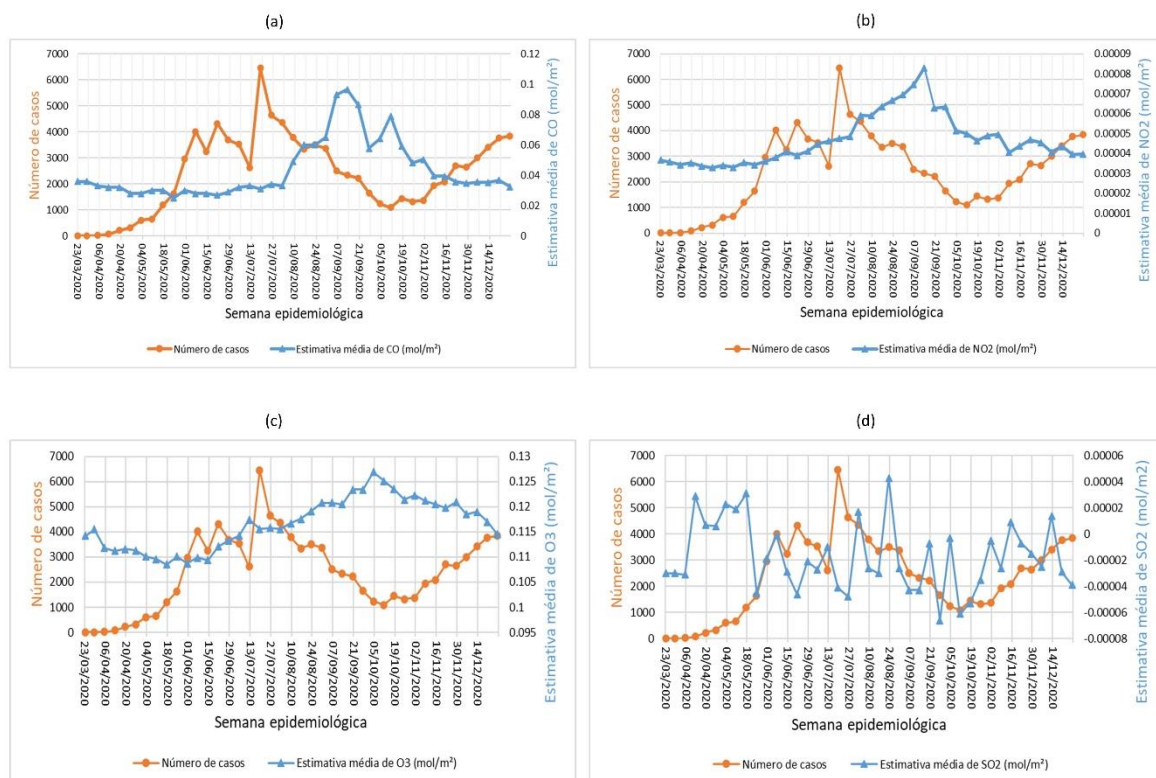
Quando o teste é significativo, é necessário a utilização de outro modelo para incluir o componente espacial, nesse caso o modelo utilizado seria o *Geographical Weighted Regression* (GWR), que é um método de regressão espacial local. De acordo com Druck et al., (2004), este método assume que o espaço é heterogêneo e as variáveis dependentes e independentes podem assumir padrões mais ou menos regionalizados.

RESULTADOS

O risco de mortalidade por Covid-19 depende de uma série de variáveis como taxa de disseminação, ausência de cuidados preventivos e questões hereditárias. Além disso, fatores ecológicos também podem ter influência na mortalidade e disseminação da doença (FRONTERA, 2020; ZAMBRANO-MONSERRATE; RUANO; SANCHEZ-ALCALDE, 2020).

No ano de 2020 as maiores concentrações de CO, NO₂ e O₃ foram observadas no período de seca na Amazônia, nos meses de agosto, setembro e outubro. Esse período coincidiu com a diminuição da taxa de casos por Covid-19 (Figura 2).

Figura 2 – Correlação gráfica da incidência de Covid-19 em Rondônia e poluentes com base no processamento de imagens Sentinel-5P no GEE entre a décima terceira semana epidemiológica e a quinquagésima terceira semana epidemiológica de 2020. a) Concentração troposférica de CO, b) Concentração troposférica de NO2 c) Concentração troposférica de O3 e d) Concentração troposférica de SO2

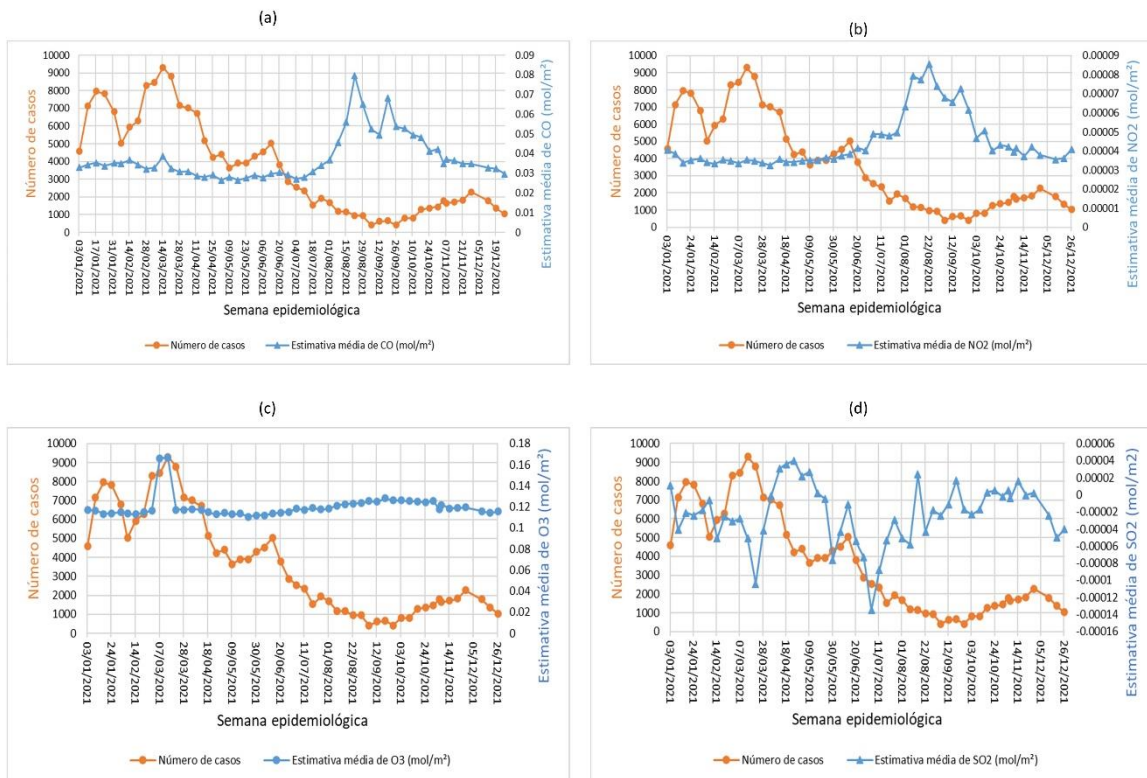


Fonte: Autores, 2022.

Apenas a variável SO₂ não apresentou um padrão definido de ocorrência entre março a dezembro de 2020. A correlação gráfica aponta para uma relação inversa entre os casos de covid-19 e as variáveis de poluição do ar. Destaca-se que em 2020 algumas atividades não essenciais foram suspensas obrigando as pessoas a adotarem o trabalho em home office. Entre as medidas adotadas estavam a proibição da realização de eventos e reuniões, tanto de caráter público quanto privado, e reuniões presenciais com mais de 5 (cinco) pessoas, com exceção para as reuniões de governança e enfrentamento da doença (RONDÔNIA, 2020a; RONDÔNIA, 2020b). Porém, a emissão de poluentes em 2020 foi mais elevada do que o observado em 2021.

Em 2021 houve aumento das emissões de NO₂ entre julho e setembro, diminuindo a partir de outubro. A estimativa de CO apresenta uma alta no período seco voltando a diminuir com a chegada do período chuvoso, os meses de outubro a novembro. Situação semelhante é observada com o poluente NO₂. A variável O₃ possui valores constantes, tendo alta apenas no mês de março. A taxa de casos por Covid-19 indica não sofrer alteração com a elevação e queda das variáveis de poluição do ar (Figura 3).

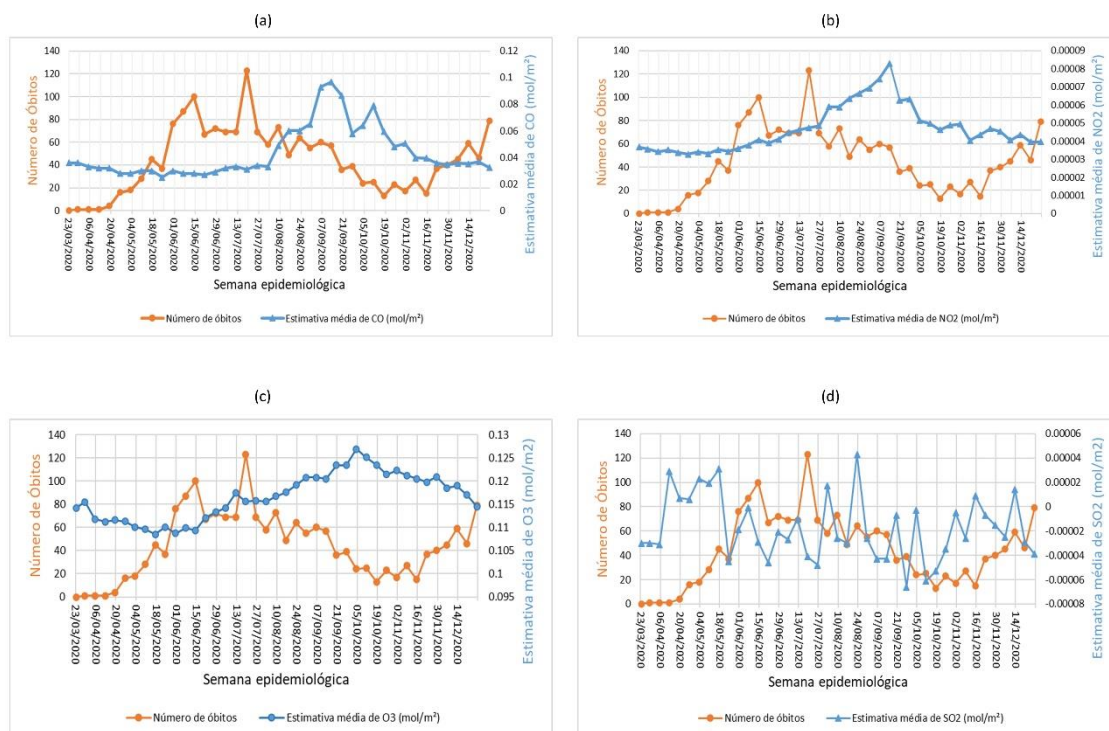
Figura 3 – Correlação gráfica da incidência de Covid-19 em Rondônia e poluentes com base no processamento de imagens Sentinel-5P no GEE entre a primeira semana epidemiológica e a quinquagésima segunda semana epidemiológica de 2021. a) Concentração troposférica de CO, b) Concentração troposférica de NO₂ c) Concentração troposférica de O₃ e d) Concentração troposférica de SO₂



Fonte: Autores, 2022.

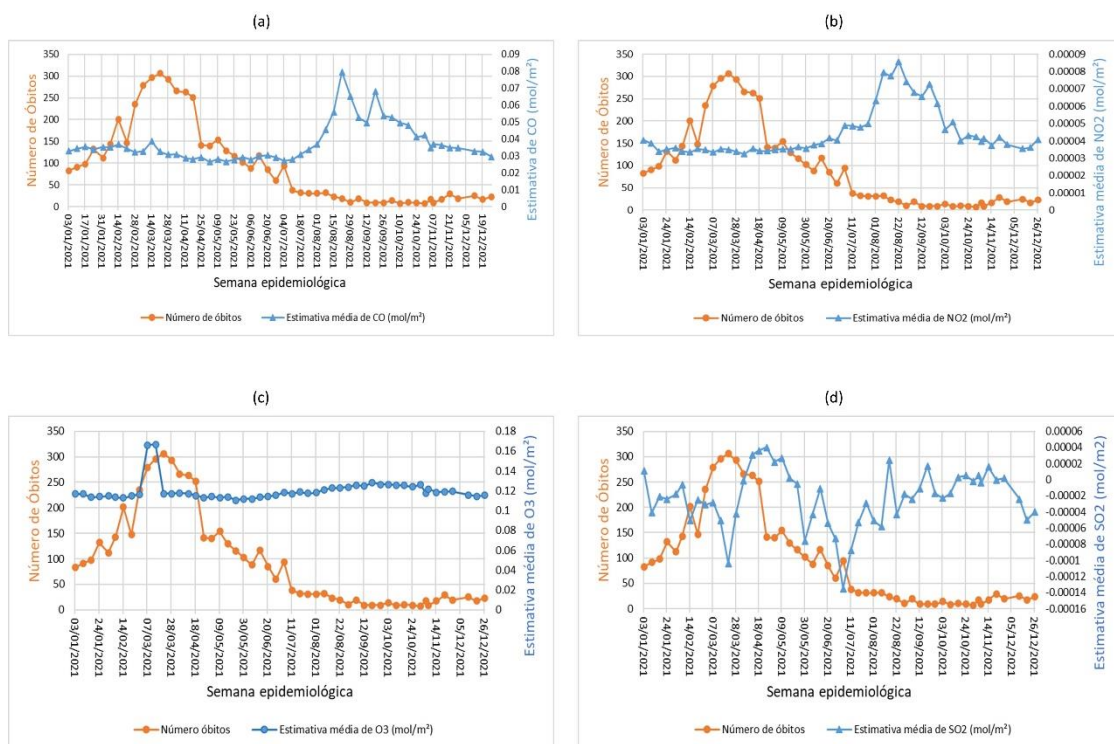
A comparação entre a taxa de óbitos e as variáveis de poluição do ar também apontam para uma relação de independência (Figuras 4 e 5).

Figura 4 – Correlação gráfica do número de óbitos por Covid-19 em Rondônia e poluentes com base no processamento de imagens Sentinel-5P no GEE entre a décima terceira semana epidemiológica e a quinquagésima terceira semana epidemiológica de 2020. **a)** Concentração troposférica de CO, **b)** Concentração troposférica de NO₂ **c)** Concentração troposférica de O₃ e **d)** Concentração troposférica de SO₂



Fonte: Autores, 2022.

Figura 5 – Correlação gráfica do número de óbitos por Covid-19 em Rondônia e poluentes com base no processamento de imagens Sentinel-5P no GEE entre a primeira semana epidemiológica e a quinquagésima segunda semana epidemiológica de 2021. a) Concentração troposférica de CO, b) Concentração troposférica de NO₂ c) Concentração troposférica de O₃ e d) Concentração troposférica de SO₂



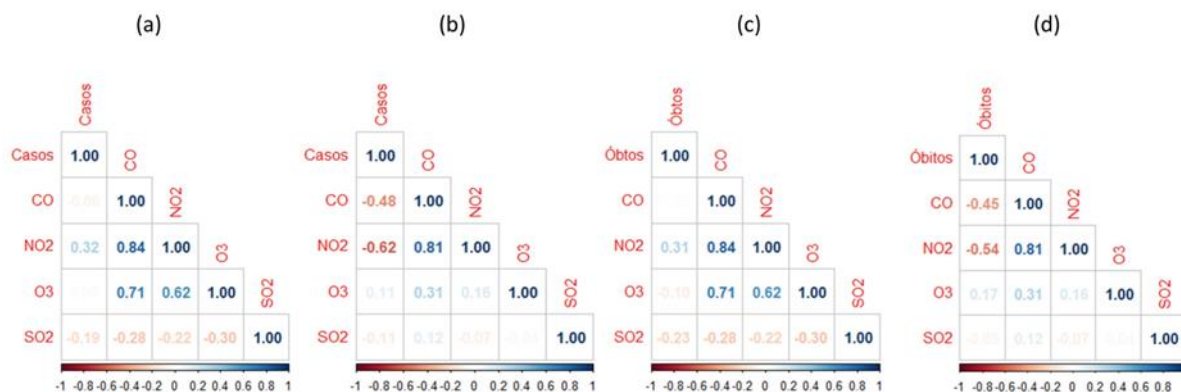
Fonte: Autores, 2022.

Em 2020 a taxa de óbitos se mantém elevada em junho e julho, voltando a cair em agosto. Nesse período observa-se uma modesta elevação do O₃ e NO₂. Porém, essa elevação não nos permite afirmar que as mortes tiveram influência do aumento destes gases. Nos meses de novembro a dezembro as taxas de óbitos voltaram crescer, mesmo com a diminuição da concentração dos gases analisados. E nos primeiros quatro meses de 2021 a taxa de óbitos se mantém elevada, enquanto a concentração dos poluentes permanecem constante.

Correlação de Pearson

A correlação de Pearson entre taxa de casos e óbitos por Covid-19 e as variáveis ambientais analisadas apontou para uma fraca correlação em 2020 e em 2021. Em 2020 apenas o dióxido de nitrogênio obteve correlação positiva com a taxa de casos por Covid-19, porém houve uma correlação fraca (Figura 6).

Figura 6 – Gráfico da correlação de Pearson **a)** Correlação entre a taxa de casos de Covid-19 e variáveis ambientais em 2020 e **b)** correlação entre taxa de casos e variáveis ambientais em 2021. **c)** e **d)** correlação entre taxa de óbitos por Covid-19 e variáveis ambientais em 2020 e 2021 respectivamente



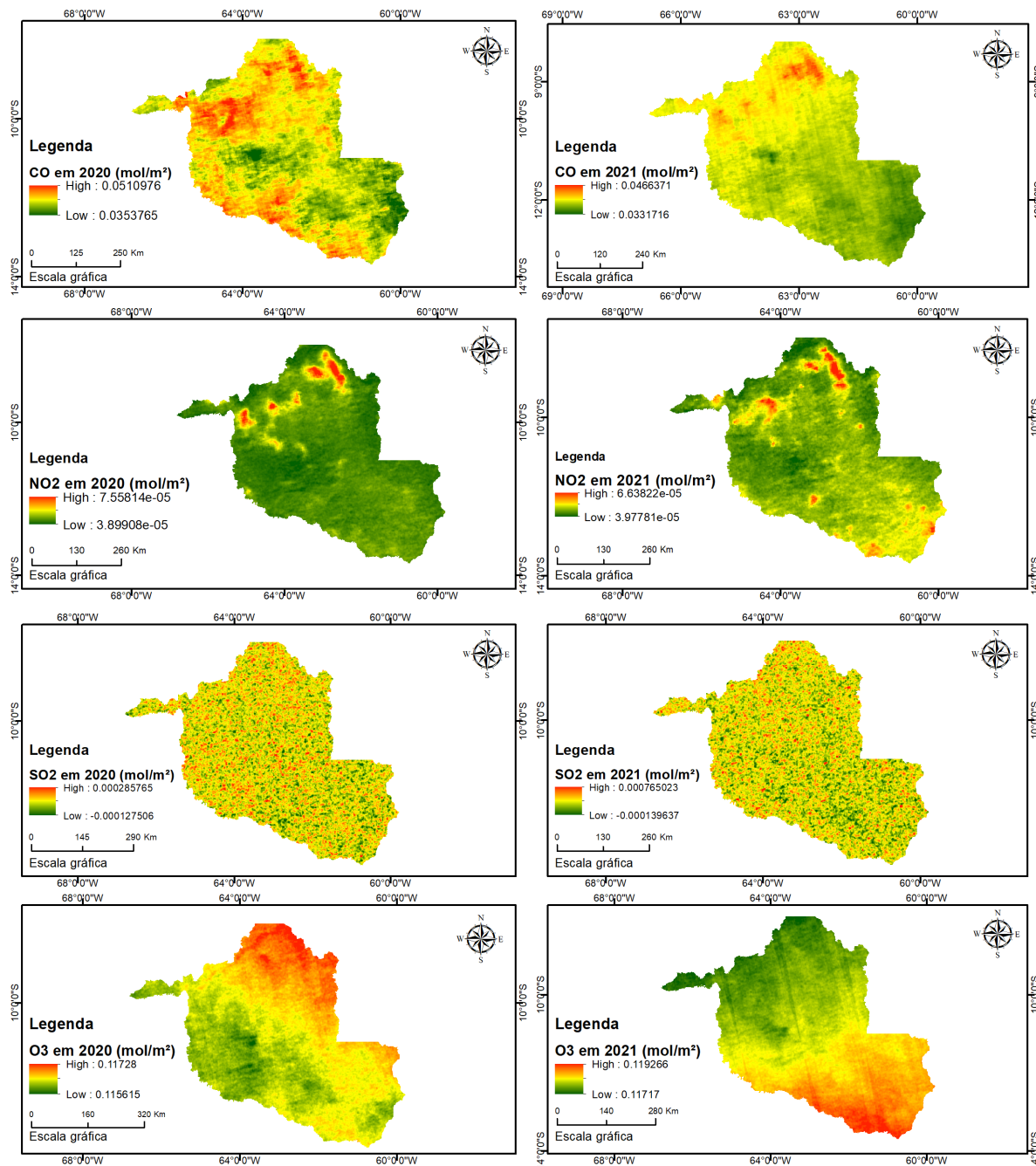
Fonte: Autores, 2023.

Em 2021 o dióxido de nitrogênio e a taxa de casos por Covid-19 manteve uma correlação moderada, porém inversa, ou seja, quanto maior a incidência desse poluente, menor é a taxa de casos por Covid-19. Isso pode indicar a possibilidade dessa variável não interferir na incidência dos casos, pelo menos em médio prazo. Destaca-se também, que é a partir de 2021 que se inicia a vacinação no Brasil.

Com relação à taxa de óbitos apenas a variável NO2 mantém uma correlação positiva em 2020, porém muito fraca. Khan (2022), afirma que as variáveis de poluição do ar (NO2, PM 2.5 e PM 10) desempenham um papel significativo para a probabilidade de mortalidade por Covid-19 em províncias do Paquistão. Estudos de Marquès e Domingo (2022), Ali e Islam (2020) também vão nessa direção. Porém, os resultados encontrados em Rondônia não permitem assinalar a mesma relação de significância encontrada em estudos realizados na América do Norte, Europa e Ásia.

Em 2021 a correlação é moderada e inversa, também indicando para a influência dos efeitos da vacinação nesse período. As variáveis O3 e SO2 apontam para correlação negativa e fraca em 2020 e em 2021 o O3 apresenta correlação positiva e muito fraca. O monóxido de carbono apresenta correlação inversa e moderada em 2021. Estes resultados contrariam os estudos recentes que apontam para uma correlação positiva de variáveis ambientais de poluição do ar com casos e mortalidade por Covid-19. A distribuição da concentração dos poluentes analisados no Estado de Rondônia entre 2020 e 2021 pode ser visualizada na figura 7.

Figura 7 – Estimativa média de CO, NO₂, SO₂ e O₃ para os anos de 2020 e 2021 em Rondônia a partir de dados do Sensor TROPOMI, satélite Sentinel 5P



Fonte: Autores, 2022.

As maiores concentrações de CO, O₃ e NO₂ em 2020 se encontraram na região norte do estado e nas áreas de fronteira com a Bolívia. Em 2021 apenas a variável O₃ tem mudança significativa em relação às áreas de maior concentração, passando ser mais concentrada a sudeste do estado. Apenas a variável SO₂ apresentou distribuição semelhante em todo o estado.

Regressão espacial

Para este modelo apresentado no quadro 2, nenhuma variável apresentou probabilidade (*Probability*) significativa ($p < 0,05$), conseqüentemente as demais estatísticas também não apontam relação significativa entre a variável dependente e as variáveis independentes. Isso aponta para a inexistência de um preditor estatisticamente significativo para explicar a variação da taxa de casos de Covid-19 em 2020.

Quadro 2 – Teste de Regressão da OLS entre taxa de casos e variáveis de poluição do ar em 2020

Variável	Coeficiente	StdError	t-Statistic	Probability	VIF
Intercept	-237789.9	199952.1	-1.189234	0.230321	-----
CO	123058.1	349029.5	0.352572	0.725987	1.290054
NO ₂	194828606	236614505	0.823401	0.414437	1.406119
SO ₂	-595106.5	52418855	-0.011353	0.990990	1.068328
O ₃	1953152.7	1748508	1.117039	0.269655	1.155866

Fonte: Autores, 2022.

O Fator de Inflação da Variância (VIF) indica a existência de redundância ou multicolinearidade entre as variáveis explicativas (MILOCA *et al.*, 2008). Quando o valor VIF é maior que 7,5 existe redundância no conjunto de dados, indicando que duas ou mais variáveis possuem a mesma capacidade de explicar a variação da variável dependente. Nesse caso, torna-se necessário retirar a variável redundante, ou até inserir novas variáveis, aumentando o tamanho da amostra. O diagnóstico da OLS pode ser visualizado no Quadro 3.

Quadro 3 – Diagnóstico da OLS entre taxa de casos e variáveis de poluição do ar em 2020

Número de observações	52	Akaike's Information Criterion (AICc)	953.891766
Multiple R-Squared	0.077741	Adjusted R-Squared	-0.000749
Joint F-Statistic	0.990459	Prob (>F), (4,47) degrees of freedom	0.422040
Join Wald Statistic	3.255627	Prob (>chi-squared), (4) degrees of freedom	0.515993
Koenker (BP) Statistic	2.414650	Prob (>chi-squared), (4) degrees of freedom	0.659981
Jarque-Bera Statistic	8.220019	Prob (>chi-squared), (2) degrees of freedom	0.016408*

Nota: * Um asterisco após o número indica significância estatística ($p < 0,05$).

Fonte: Autores, 2022.

O *Multiple R-Squared*, também conhecido como coeficiente de determinação, explica a proporção, em percentual ou em uma escala que varia entre 0 e 1, da variação na variável dependente que pode ser explicada pelas variáveis independentes utilizadas. Essa medida ajuda a verificar a qualidade do modelo. Como a análise utiliza mais de uma variável torna-se necessário analisar também o *Adjusted R-Squared*, que no modelo apresentado no quadro 3 teve valor 0, indicando que este modelo não explica a variação dos casos de Covid-19 no período analisado.

Outro diagnóstico importante é o Critério de Informação de Akaike (AICc), que ajuda a comparar o desempenho de diferentes modelos que utilizam diferentes variáveis explicativas, porém com a mesma variável dependente. Nesse caso, o modelo com o menor valor AICc irá fornecer o melhor ajuste aos dados utilizados.

O teste de Koenker (BP) da OLS não é estatisticamente significativo $p = 0.659981$, indicando que as relações entre a variável dependente e todas as variáveis independentes são estacionárias, ou seja, se desenvolvem aleatoriamente no tempo em torno da média, de forma que suas propriedades não

dependem do momento em que foi observada. Já uma série não estacionária possui propriedades estatísticas que mudam com o tempo.

A ocorrência de não-estacionariedade é pressuposto básico para a aplicação do teste de regressão local *Geographical Weighted Regression* (GWR), pois a aplicação desse modelo pode melhorar os resultados da regressão. Além disso, pressupõe-se que modelos estacionários tem a propriedade de que a média, variância e a estrutura de autocorrelação não passem por mudanças no decorrer do tempo. Mesmo sabendo que o conjunto de dados de comporta de forma estacionária, faz-se necessário analisar os resíduos do teste de regressão para verificar a existência de possíveis relações não lineares no conjunto de dados.

Verificou-se que os resíduos do modelo testado não apresentam uma distribuição normal, já que o resultado do teste de Jarque-Bera foi de 0.016408 com $p < 0,05$. Quando o teste de Jarque-Bera é estatisticamente significativo as previsões do modelo são tendenciosas, indicando também relações não lineares ou valores atípicos. Assim, a hipótese nula H_0 é de que os resíduos padronizados apresentam distribuição aleatória na área em estudo. Se o p-valor for significativo no teste de autocorrelação espacial, rejeita-se a hipótese nula, sugerindo haver padrões espaciais entre os dados analisados.

Os resíduos são calculados utilizando valores conhecidos para a variável dependente (y) e independentes (x), onde a ferramenta de regressão irá prever os valores y conhecidos. Porém, estes valores previstos raramente correspondem aos valores exatos observados. Essa diferença entre os valores y observados e os valores y previstos é chamada de resíduo. O teste de autocorrelação espacial dos resíduos da OLS foi utilizado para verificar se os dados apresentam um padrão agrupado, disperso ou aleatório (Quadro 4). A avaliação da autocorrelação foi feita mediante a estatística Global de Moran.

Quadro 4 – Teste de autocorrelação espacial dos resíduos da OLS

Moran's Index	-0.063990
Expected Index	-0.019608
Variance	0.003541
z-score	-0.745795
p-value	0.455791

Fonte: Autores, 2022.

O teste de autocorrelação espacial dos resíduos da OLS não apresentou clusterização, visto que o p-valor foi maior que 0.05 com I Moran de -0.063990 apontando para independência espacial entre a variável dependente e as variáveis independentes. Anselin (1995), destaca que o mapeamento dos resíduos permite avaliar do ponto de vista espacial os resultados do modelo, indicando possíveis regiões ou sub-regiões superestimadas, onde mesmo com a existência de valores estatisticamente insignificantes na estatística Global de Moran, ainda assim pode indicar a existência de padrões espaciais.

Nenhuma variável apresentou probabilidade significativa ($p < 0,05$) para explicar a variação da taxa de casos de Covid-19 em 2021 (quadro 5). Todas as variáveis independentes tiveram valor VIF abaixo de 7,5.

Quadro 5 – Teste de Regressão da OLS entre taxa de casos e variáveis de poluição do ar em 2021

Variável	Coeficiente	StdError	t-Statistic	Probability	VIF
Intercept	-123439.7	337577.8	-0.365663	0.716259	-----
CO	-289230.2	622736.8	-0.464450	0.644471	4.062809
NO ₂	248939569.4	473020871.7	0.526276	0.601172	1.765523
SO ₂	84007308.9	80455131.3	1.044151	0.301755	1.373069
O ₃	1141768.7	2791619.2	0.408999	0.684400	5.359077

Fonte: Autores, 2022.

O teste de Koenker (BP) apresentou p-valor > 0,05, indicando que as variáveis são estacionárias. O teste de Jarque-Bera indicou haver uma distribuição normal, não havendo valores atípicos no conjunto de dados, indicando que as previsões do modelo não são tendenciosas (Quadro 6), não havendo a necessidade de elaboração do teste de autocorrelação espacial dos resíduos para a verificação da existência de clusters.

Quadro 6 – Diagnóstico da OLS entre taxa de casos e variáveis de poluição do ar em 2021

Número de observações	52	Akaike's Information Criterion (AICc)	988.203670
Multiple R-Squared	0.070033	Adjusted R-Squared	-0.009113
Joint F-Statistic	0.884855	Prob (>F), (4,47) degrees of freedom	0.480331
Join Wald Statistic	5.989290	Prob (>chi-squared), (4) degrees of freedom	0.199950
Koenker (BP) Statistic	2.258404	Prob (>chi-squared), (4) degrees of freedom	0.688352
Jarque-Bera Statistic	1.233377	Prob (>chi-squared), (2) degrees of freedom	0.539729

Fonte: Autores, 2022.

O valor AICc do diagnóstico da OLS para as taxas de casos e variáveis de poluição do ar foi de 953.8 em 2020 e 988.2 em 2021, indicando que o primeiro modelo teve um desempenho melhor.

Diagnóstico da OLS e teste de regressão entre taxa de óbitos variáveis de poluição do ar

Além dos testes de regressão da OLS considerando a taxa de casos dos anos de 2020 e 2021 foi elaborado o teste de regressão a partir das taxas de óbitos para estes anos (Quadro 7). Para o ano de 2020 não houve probabilidade significativa das variáveis independentes terem influenciado na taxa de mortes por Covid-19 em Rondônia.

Quadro 7 – Teste de regressão da OLS entre taxa de óbitos e variáveis de poluição do ar em 2020

Variável	Coeficiente	StdError	t-Statistic	Probability	VIF
Intercept	-2563.2	5071.9	-0.505371	0.615661	-----
CO	6923.7	8853.4	0.782039	0.438112	1.290054
NO ₂	2646569.6	6001941	0.440952	0.661271	1.406119
SO ₂	-461769.3	1329651	-0.347286	0.729929	1.068328
O ₃	18957.1	44352.5	0.427420	0.671027	1.155866

Fonte: Autores, 2022.

O teste de Koenker (BP) da OLS não é estatisticamente significativo com p-valor > 0.05, indicando um comportamento estacionário, possuindo propriedades estatísticas que não mudam ao longo do tempo (Quadro 8). O teste de Jarque-Bera apresentou p-valor < 0.05, não tendo distribuição normal, podendo haver relações não lineares ou valores atípicos, sugerindo a necessidade da aplicação do teste de autocorrelação espacial dos resíduos.

Quadro 8 – Diagnóstico da OLS entre taxa de óbitos e variáveis de poluição do ar em 2020

Número de observações	52	Akaike's Information Criterion (AICc)	571.759441
Multiple R-Squared	0.039567	Adjusted R-Squared	-0.042172
Joint F-Statistic	0.484068	Prob (>F), (4,47) degrees of freedom	0.747297
Join Wald Statistic	2.134734	Prob (>chi-squared), (4) degrees of freedom	0.710994
Koenker (BP) Statistic	4.075475	Prob (>chi-squared), (4) degrees of freedom	0.395888
Jarque-Bera Statistic	59.122783	Prob (>chi-squared), (2) degrees of freedom	0.000000*

Fonte: Autores, 2022.

O teste de autocorrelação espacial dos resíduos da regressão global da OLS (Quadro 9), não apresentou clusterização, com I Moran de -0.035665 e p-valor > 0.05. Por tanto, o teste não foi significativo.

Quadro 9 – Teste de autocorrelação espacial dos resíduos da OLS entre taxa de óbitos e variáveis explanatórias em 2020.

Moran's Index	-0.035665
Expected Index	-0.019608
Variance	0.003313
z-score	-0.278963
p-value	0.780274

Fonte: Autores, 2022.

Os dados obtidos a partir do teste de regressão da OLS entre a taxa de óbitos e variáveis de poluição do ar em 2021 também sugerem não haver relação estatística significativa entre a variáveis explanatórias e explicativas, dado que nenhum das variáveis analisadas apresentou p-valor < 0.05 (Quadro 10).

Quadro 10 – Teste de regressão da OLS entre a taxa de óbitos e variáveis de poluição do ar em 2021

Variável	Coefficiente	StdError	t-Statistic	Probability	VIF
Intercept	-9228	8910.1	-1.035606	0.305684	-----
CO	6562.2	16437.9	0.399211	0.691548	4.062809
NO ₂	-6400854	12486011	-0.512642	0.610603	1.765523
SO ₂	-192094.4	2123719.5	-0.090452	0.928312	1.373069
O ₃	80398.1	73688.4	1.091055	0.280810	5.359077

Fonte: Autores, 2022.

O diagnóstico da OLS aponta que o teste de Koenker (BP) e de Jarques-Bera apresentou p-valor > 0,05, indicando variáveis estacionárias e distribuição normal (Quadro 11). O R-quadrado ajustado não apresentou valor significante, indicando não haver relações espaciais significantes entre as variáveis analisadas. O valor de Akaike (AICc) obteve valor 610.21 tendo uma piora considerável em relação ao AICs observado no diagnóstico da OLS entre a taxa de óbitos e variáveis de poluição do ar em 2020, que foi de 571.7.

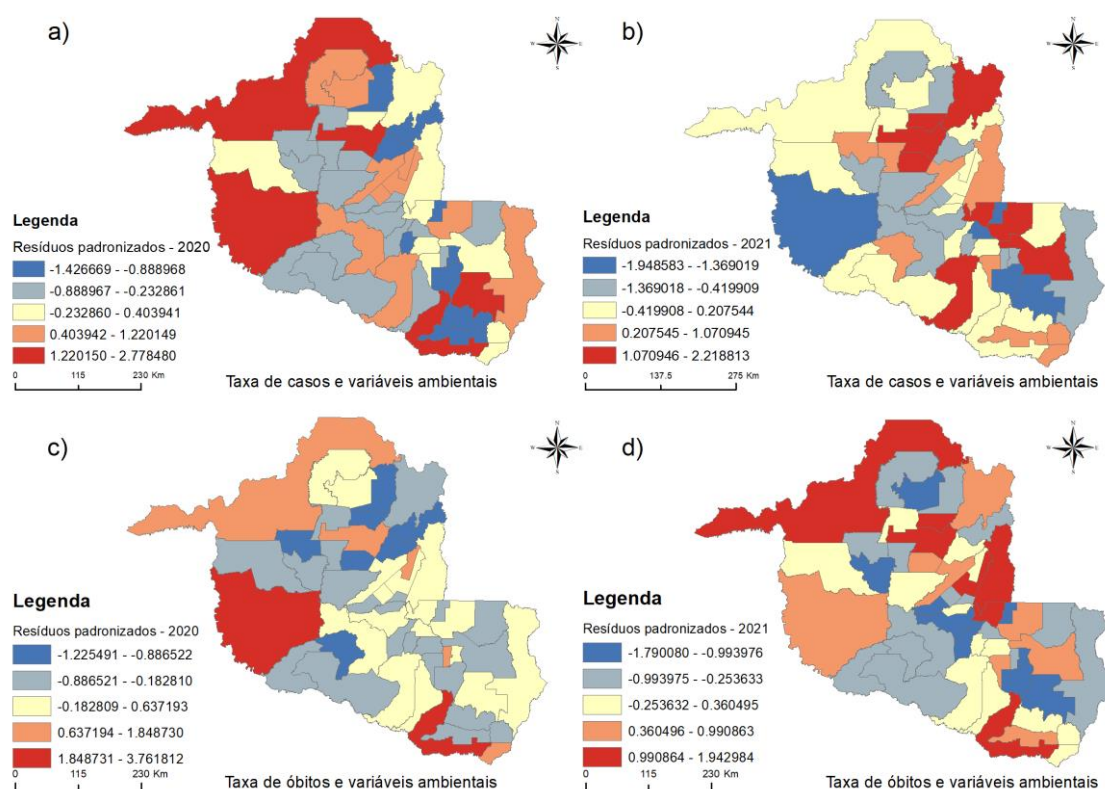
Quadro 11 – Diagnóstico da OLS entre taxa de óbitos e variáveis de poluição do ar em 2021

Número de observações	52	Akaike's Information Criterion (AICc)	610.21
Multiple R-Squared	0.053096	Adjusted R-Squared	-0.027492
Joint F-Statistic	0.658860	Prob (>F), (4,47) degrees of freedom	0.623648
Join Wald Statistic	3.367218	Prob (>chi-squared), (4) degrees of freedom	0.498353
Koenker (BP) Statistic	2.236665	Prob (>chi-squared), (4) degrees of freedom	0.692323
Jarque-Bera Statistic	1.714929	Prob (>chi-squared), (2) degrees of freedom	0.424236

Fonte: Autores, 2022.

Os resíduos padronizados são resultados da diferença entre os valores conhecidos e os valores esperados. Nesta pesquisa, verifica-se que os resíduos das análises para o ano de 2020 e 2021 não apresentam um padrão espacial definido. Isso se verifica pelos valores extremos e distantes do valor zero nos mapas (Figura 8).

Figura 8 – Mapa dos resíduos padronizados da OLS. **a)** taxa de casos por Covid-19 e variáveis ambientais em 2020. **b)** taxa de casos por Covid-19 e variáveis ambientais em 2021. **c)** taxa de óbitos e variáveis ambientais em 2020 **d)** taxa de óbitos e variáveis ambientais em 2021



Fonte: Autores, 2022.

A inexistência de um padrão definido nos mapas dos resíduos padronizados aponta para a incapacidade de o modelo explicar a relação da Covid-19 com as variáveis de poluição do ar.

Nesse sentido, os resultados apontam para a fraca correlação entre a poluição do ar e a Covid-19 em Rondônia no período analisado. Observa-se que mesmo diante de períodos de quarentena, não houve diminuição aparente das emissões dos poluentes analisados no ano de 2020. Além disso, os resultados não invalidam a necessidade de continuação dos estudos com a tentativa de encontrar correlação e/ou associação em um intervalo maior de análise.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A correlação de Pearson apontou para correlação muito fraca, fraca e moderada entre a taxa de casos e óbitos por Covid-19 e as variáveis ambientais de poluição do ar, tendo a variável NO₂ p-valor 0.32 em 2020 e p-valor -0,62 em 2021 para a taxa de casos. Foi observado que tanto para a taxa de casos quanto para a taxa de óbitos as variáveis tiveram correlação positiva em 2020 e negativa em 2021, indicando independência entre as variáveis, fato comprovado com a aplicação dos testes de regressão.

Todos os modelos analisados tiveram probabilidade e R-quadrado ajustado com p-valor > 0,05. Estes resultados foram reforçados com a aplicação dos testes de Koenker (BP), Jarque-Bera e autocorrelação dos resíduos do teste de regressão dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) para a taxa de casos e óbitos por Covid-19 em 2020 e 2021.

Não há evidências sólidas que indiquem a influência dos poluentes analisados na propagação da Covid-19 na área em estudo no período analisado. Trata-se de um resultado que aponta na direção contrária de estudos recentes na área. Porém, ressalva-se a necessidade de redução da concentração de poluentes atmosféricos na área em estudo, pois ainda não se conhece o real efeito de longo prazo da alta concentração de poluentes atmosféricos para o agravamento do quadro de saúde ocasionado por doenças respiratórias.

A ausência de variáveis como doenças prévias, obesidade e hábito de fumar não incluídas no estudo podem constituir como limitações da pesquisa. Além disso, há a necessidade de considerar a inclusão de um lag temporal entre o contato com o vírus, o adoecimento e a testagem, com a finalidade de verificar novos cenários envolvendo a relação entre casos e óbitos por Covid-19 e as variáveis de poluição do ar.

Por isso, pesquisas futuras são necessárias para testar melhor a hipótese da relação entre a poluição do ar e a Covid-19, que levem em consideração a inclusão de novos métodos de análise, outros poluentes atmosféricos (PM 2.5 e PM 10), período temporal maior, influência da taxa de vacinação, ocorrência de lockdown na área em estudo e investigação levando em consideração a estratificação da população por faixa etária.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro e logístico: CAPES (Processo Nº: 88887.695915/2022-00), FAPERO-PPSUS-RO (Processo Nº: 0012.031902/2021-91). A REMONAR - Rede de Monitoramento de COVID-19 em Águas Residuais do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), Ministério da Saúde (MS) e a equipe dos grupos de Pesquisas do LABOGEOPA, BIOCLAM e CIBEPI da Universidade Federal de Rondônia pelo suporte acadêmico, técnico e logístico.

REFERÊNCIAS

ALI, N; ISLAM, F. The effects of air pollution on COVID-19 infection and mortality-A review on recent evidence. **Frontiers in public health**, v. 8, p. 580057, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.580057>

ANSELIN, L., Local Indicators of Spatial Association – LISA. In: Geographical Analysis, Vol. 27, No. 2 (April 1995). <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>

BATESON, TF; SCHWARTZ, J. Children's response to air pollutants. **J Toxicol Environ Health**. 2008;71(3): 238-43. <https://doi.org/10.1080/15287390701598234>

BRASIL. Painel Coronavírus, 2022.

BRASIL. Painel Coronavírus, 2023.

CAHYADI, M.N.; HANDAYANI, H.H.; WARMADWANTHI, I.; ROKHMANA, C.A.; SULISTIAWAN, S.S.; WALOEDIO, C.S.; RAHARIO, A.B.; E.; ATOK, M.; NAVISA, S.C.; et al. Spatiotemporal Analysis

- for COVID-19 Delta Variant Using GIS-Based Air Parameter and Spatial Modeling. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022, 19, 1614. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031614>
- CONTINI, D; COSTABILE, F. Does Air Pollution Influence COVID-19 Outbreaks? *Atmosphere*. 2020, 11, 377; <https://doi.org/10.3390/atmos11040377>
- COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale, NJ, Erlbaum. 1988. Disponível em: <https://www.utstat.toronto.edu/~brunner/oldclass/378f16/readings/CohenPower.pdf>
Acesso em: 28 out. 2023.
- DANCEY, C; REIDY, J. Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre, Artmed. 2006.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. (eds) "Análise Espacial de Dados Geográficos". Brasília, EMBRAPA, 2004. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>
Acesso em: 16 dez. 2022.
- FRONTERA, A; et al. Regional air pollution persistence links to COVID-19 infection zoning. *Journal of Infection*, v. 81, n. 2, p. 318-356, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.03.045>
- GIANGRECO, G. Case fatality rate analysis of Italian COVID-19 outbreak. *J Med Virol*. 2020, 92,7, 919-923. <https://doi.org/10.1002/jmv.25894>
- HASSAN, M.S.; BHUIVAN, M.A.H.; TAREQ, F.; BODRUD-DOZA, M.; TANU, S.M.; RABBANI, K.A. Relationship between COVID-19 infection rates and air pollution, geometeorological, and social parameters. *Environ. Monit. Assess*. 2021, 193, 29. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08810-4>
- KHAN, Y.A. Risk of mortality due to COVID-19 and air pollution in Pakistan. *Environ Sci Pollut Res* 29, 2063–2072 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15654-z>
- KO, FW; HUI, DS. Air pollution and chronic obstructive pulmonary disease. *Respirology*. 2012;17(3):395-401. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1843.2011.02112.x>
- LEIRIÃO, L. F. L; DEBONE, D; MIRAGLIA, S.G. E. K. Does air pollution explain COVID-19 fatality and mortality rates? A multi-city study in São Paulo state, Brazil. *Environ Monit Assess* 194, 275 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09924-7>
- LIPPMANN, M. Health effects of ozone A Critical Review. *JAPCA*, 39(5), p.672-695. 1989. <https://doi.org/10.1080/08940630.1989.10466554>
- LOPEZ-COTO, I; et al. Carbon Monoxide Emissions from the Washington, DC, and Baltimore Metropolitan Area: Recent Trend and COVID-19 Anomaly. *Environmental Science & Technology*, v. 56, n. 4, p. 2172-2180, 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06288>
- MACHADO SILVA, F. *et al.* Drought and fires influence the respiratory diseases hospitalizations in the Amazon. *Ecological Indicators*, v. 109, 1 fev. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105817>
- MARQUÈS, M; DOMINGO, J. L. Positive association between outdoor air pollution and the incidence and severity of COVID-19. A review of the recent scientific evidences. *Environmental Research*, v. 203, p. 111930, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111930>
- MILOCA, S. A; CONEJO, P. D: Multicolinearidade em Modelos de Regressão. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2008. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~yambar/MI404-Metodos%20Estatisticos/Aula%208-9%20Regress%E3o%20mult%20dim/inete%20adicional%20-%20multicolinearidade%20em%20modelos%20de%20regressao.pdf>
- MIRANDA, M. J. **Análise Geográfica de nascimentos pré-termo no Estado de São Paulo, na RMSP e no município de São Paulo**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da USP). São Paulo, 2015. 106 f.
- MONSERRATE, M. A. Z; RUANO, M. A.; ALCADE, L. S. Indirect effects of COVID-19 on the environment. *Science of The Total Environment*. Volume 728, 1 August 2020, 138813. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138813>

NUVOLONE, D.; PETRI, D.; VOLLER, F. The effects of ozone on human health. **Environmental Science and Pollution Research**, 25(9), p. 8074-8088. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9239-3>

OLIVEIRA, N; VESSONI, AT; QUINET, A; FORTUNATO, RS; KAJITANI, GS; PEIXOTO, MS; HACON, SS; ARTAXO, P; SALDIVA, P; MENCK, CFM; BATISTUZZO, MSR. Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Scientific Reports**, v. 7, p. 10937, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11024-3>

PARANHOS, R; et al. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson: o retorno. **Leviathan (São Paulo)**, n. 8, p. 66-95, 2014. <https://doi.org/10.11606/issn.2237-4485.lev.2014.132346>

RODRIGUES, P. C. O; IGNOTTI, E; HACON, S. S. Distribuição espaço-temporal das queimadas e internações por doenças respiratórias em menores de cinco anos de idade em Rondônia, 2001 a 2010. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 22, n. 3, p. 455-464, 2013. <https://doi.org/10.5123/S1679-49742013000300010>

RONDÔNIA. DECRETO Nº 24.887, DE 20 DE MARÇO DE 2020. Porto velho, 2020a. Disponível em: <https://rondonia.ro.gov.br/wp-content/uploads/2020/03/DECRETO-DE-CALAMIDADE-P%C3%A9ABLICA.pdf> Acesso em: 27 out. 2023.

RONDÔNIA. DECRETO Nº 24.919, DE 5 DE ABRIL DE 2020. Porto Velho, 2020b. Disponível em: <https://rondonia.ro.gov.br/publicacao/decreto-n-24-919/> Acesso em: 24 out. 2023.

VEEFKIND, J. P; et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. **Remote sensing of environment**, v. 120, p. 70-83, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>

VOORS, R; et al. TROPOMI, the Sentinel 5 Precursor instrument for air quality and climate observations: status of the current design. In: **International Conference on Space Optics—ICSO 2012**. SPIE, 2017. p. 442-446. <https://doi.org/10.1117/12.2309017>

WHO. **Air Pollution**. Disponível em: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1, 2016.

YAMAMOTO, A. L. C.; REBOITA, M. S.; CORRÊA, M. P. Conhecendo as diferentes faces do ozônio. **Terrae Didatica**, v. 17, p. e021036-e021036, 2021. <https://doi.org/10.20396/td.v17i00.8666858>

ZAMBRANO-MONSERRATE, M. A; RUANO, M. A.; SANCHEZ-ALCALDE, L. Indirect effects of COVID-19 on the environment. **Science Total Environment**, 2020. 728:138813. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138813>