

VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E NOTIFICAÇÕES DE SÍNDROME RESPIRATÓRIA AGUDA GRAVE NO BRASIL: ANÁLISE ECOLÓGICA POR MACRORREGIÕES

**METEOROLOGICAL VARIABLES AND NOTIFICATIONS OF SEVERE ACUTE
RESPIRATORY SYNDROME IN BRAZIL: AN ECOLOGICAL ANALYSIS BY
MACROREGION**

Ciências da Saúde • 18/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789644329](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789644329)

Victor Marcone Teixeira Dias da Silva¹

Luis Alberto Valotta²

RESUMO

A relação entre condições meteorológicas e notificações de síndrome respiratória aguda grave apresenta relevância para a vigilância em saúde, mas permanece marcada por diversidade climática, etiológica e territorial. Objetivou-se analisar associações entre variáveis meteorológicas e notificações mensais de síndrome respiratória aguda grave nas macrorregiões brasileiras. Realizou-se estudo ecológico de painel com 3.619.741 notificações registradas em 2016 a 2018 e 2020 a 2022, organizadas em 360 observações de mês, ano e macrorregião. Dados epidemiológicos oriundos do Sinan Web Influenza e do SIVEP Gripe foram integrados a informações do Instituto Nacional de Meteorologia. Empregaram-se análise descritiva por quartis intra região e ano, correlações de Spearman e regressão binomial negativa multivariada, com modelos estratificados e análise de sensibilidade com offset populacional. Velocidade máxima do vento, velocidade média do vento, temperatura média e pressão atmosférica apresentaram associações ajustadas com as notificações no modelo nacional, enquanto dias com precipitação e precipitação total não permaneceram independentemente associados. Interações entre velocidade máxima do vento, temperatura média e pressão atmosférica evidenciaram efeitos condicionais. Os modelos regionais revelaram configurações associativas distintas, sem indicar limiares meteorológicos nacionais. A pandemia coincidiu com aumento expressivo das notificações e com mudanças estruturais na circulação viral, na vigilância e na mobilidade. Conclui-se que as variáveis meteorológicas podem contribuir para a contextualização regional da vigilância respiratória, mas os achados não estabelecem causalidade, risco individual ou aplicação preditiva imediata.

Palavras-chave: Epidemiologia ambiental; Vigilância em saúde;

Sazonalidade; Regressão binomial negativa; Sistemas de informação em saúde.

ABSTRACT

The relationship between meteorological conditions and notifications of severe acute respiratory syndrome is relevant to health surveillance, yet it remains shaped by climatic, etiological, and territorial diversity. This study aimed to analyze associations between meteorological variables and monthly notifications of severe acute respiratory syndrome across Brazilian macroregions. An ecological panel study was conducted with 3,619,741 notifications recorded in 2016 to 2018 and 2020 to 2022, organized into 360 month, year, and macroregion observations. Epidemiological data from Sinan Web Influenza and SIVEP Gripe were integrated with information from the Brazilian National Institute of Meteorology. Descriptive analyses based on within macroregion and year quartiles, Spearman correlations, and multivariable negative binomial regression were performed, including stratified models and a population offset sensitivity analysis. Maximum wind speed, mean wind speed, mean temperature, and atmospheric pressure showed adjusted associations with notifications in the national model, whereas rainy days and total precipitation were not independently associated. Interactions involving maximum wind speed, mean temperature, and atmospheric pressure indicated conditional effects. Regional models showed distinct associational configurations without identifying national meteorological thresholds. The pandemic period coincided with a marked rise in notifications and structural changes in viral circulation, surveillance, and mobility. Meteorological variables may support the regional contextualization of respiratory surveillance; however, the findings do not establish causality, individual risk, or immediate predictive

applicability.

Keywords: Environmental epidemiology; Health surveillance; Seasonality; Negative binomial regression; Health information systems.

1. INTRODUÇÃO

Reconhecida como desfecho clínico de grande relevância para a vigilância em saúde, A Síndrome Respiratória Aguda Grave, SRAG, reúne manifestações potencialmente graves que demandam atenção hospitalar, investigação epidemiológica e, em muitos casos, confirmação laboratorial. Sua importância não se restringe à carga assistencial, pois também pode sinalizar alterações na circulação de vírus respiratórios. Contudo, SRAG não equivale à influenza, à COVID-19 ou a qualquer agente isolado, constituindo um desfecho sindrômico influenciado por diferentes etiologias, perfis clínicos, faixas etárias e contextos territoriais (Falsey et al., 2014; Fitzner et al., 2018; Paules; Subbarao, 2017).

Nessa perspectiva, associações entre condições meteorológicas e notificações mensais não demonstram efeito direto sobre uma infecção específica ou sobre transmissão individual. Tais padrões podem refletir interação entre circulação viral, suscetibilidade populacional, acesso aos serviços, notificação, testagem e gravidade clínica. A sazonalidade respiratória é igualmente multifatorial, envolvendo condições ambientais, comportamento coletivo e características biológicas dos vírus (Eccles, 2002; Tamerius et al., 2013). A diversidade climática brasileira intensifica essa complexidade, pois o país articula regimes equatoriais, tropicais, semiáridos, subtropicais e de transição (Nimer, 1989).

Evidências mostram que nenhuma variável meteorológica explica isoladamente a sazonalidade das infecções respiratórias. Temperatura e umidade podem afetar a estabilidade viral, a fisiologia das vias aéreas e padrões de contato social, mas suas associações variam conforme o agente, o território e a escala temporal analisada (Lowen et al., 2007; Moriyama; Hugentobler; Iwasaki, 2020; Paynter, 2015).

Em climas temperados, picos respiratórios frequentemente coincidem com meses frios. Já em zonas tropicais e subtropicais, podem relacionar-se a períodos chuvosos ou a combinações particulares de temperatura e umidade. Estudos sobre vírus sincicial respiratório e outros agentes confirmam que padrões sazonais locais não devem ser transferidos automaticamente entre territórios climáticos distintos (Moura et al., 2009; Shek; Lee, 2003; Yusuf et al., 2007).

Du Prel et al. (2009) ressaltam a necessidade de interpretar parâmetros meteorológicos de forma integrada. Tamerius et al. (2013), por sua vez, demonstraram que preditores ambientais de epidemias de influenza diferem entre regiões temperadas e tropicais. Por conseguinte, uma referência climática única para todo o Brasil tende a ocultar diferenças relevantes, enquanto a análise por macrorregiões permite examinar configurações ambientalmente específicas.

Estudos sobre transmissão aérea evidenciam que ventilação, renovação do ar e condições de ambientes internos podem influenciar a concentração de aerossóis respiratórios potencialmente infecciosos (Greenhalgh et al., 2021; Li et al., 2007; Morawska; Milton, 2020; Prather et al., 2020; Wang et al., 2021). Todavia, velocidades

máxima e média do vento registradas em estações meteorológicas externas não medem ventilação em domicílios, escolas, transportes ou unidades de saúde.

Assim, as variáveis de vento deste estudo serão tratadas como indicadores de circulação atmosférica superficial. Qualquer aproximação entre menor circulação externa e maior permanência de partículas constituirá hipótese ecológica plausível, não mecanismo físico demonstrado. Essa distinção impede extrapolações indevidas entre evidências sobre transmissão aérea indoor e associações meteorológicas agregadas por macrorregião.

Embora a literatura reconheça a relevância de condições ambientais para a dinâmica respiratória, permanecem lacunas sobre como essas associações se organizam em países extensos, climaticamente diversos e epidemiologicamente heterogêneos. Estudos locais são fundamentais, mas não explicam integralmente a distribuição regional das notificações de SRAG no Brasil.

Este estudo teve como objetivo identificar padrões de associação entre variáveis meteorológicas e notificações mensais de SRAG nas macrorregiões brasileiras, nos períodos de 2016 a 2018 e 2020 a 2022. Serão combinados quartis intra região e ano, correlações de Spearman e regressão binomial negativa multivariada, sem atribuir causalidade individual, estabelecer limiares nacionais ou propor modelo preditivo.

2. MÉTODOS

2.1. Delineamento e Diretrizes de Relato

Desenvolveu-se estudo ecológico de painel, de natureza analítica e associativa, com dados agregados mensalmente por ano e macrorregião brasileira. A unidade de análise correspondeu à combinação mês, ano e macrorregião, permitindo examinar padrões temporais e territoriais das notificações de síndrome respiratória aguda grave, SRAG, em associação com indicadores meteorológicos. Por utilizar medidas populacionais agregadas, o estudo não buscou estimar risco individual, tampouco estabelecer relações causais entre condições meteorológicas e ocorrência de SRAG (Morgenstern, 1995).

A apresentação metodológica foi estruturada em consonância com as recomendações STROBE para estudos observacionais e RECORD para pesquisas baseadas em dados de rotina. Essas diretrizes orientaram a descrição das fontes, critérios de seleção, tratamento dos registros, unidade analítica, procedimentos estatísticos, limitações e estratégias de transparência científica (Benchimol et al., 2015; Von Elm et al., 2007).

2.2. Cenário, Períodos e Unidade Analítica

Abrangeram-se as cinco macrorregiões geográficas do Brasil: Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul. Essa estratificação foi adotada por permitir a comparação entre contextos territorialmente amplos, caracterizados por distintas configurações climáticas, demográficas e epidemiológicas.

Foram selecionadas duas janelas temporais não consecutivas: 2016 a 2018 e 2020 a 2022. O primeiro intervalo representou o período pré-pandêmico incluído no estudo, enquanto o segundo correspondeu ao período marcado pela emergência e circulação do SARS-CoV-2. O

ano de 2019 não integrou a análise. Portanto, os dados não constituem uma série temporal contínua de 2016 a 2022, nem a separação entre os períodos deve ser interpretada como demonstração automática de efeito causal da pandemia.

O painel final foi composto por 360 observações, resultantes de 12 meses, seis anos selecionados e cinco macrorregiões. Cada região contribuiu com 72 observações mensais, distribuídas entre 2016, 2017, 2018, 2020, 2021 e 2022.

2.3. Fonte e Processamento das Notificações de SRAG

As notificações de SRAG foram obtidas em bases públicas do Ministério da Saúde. Para 2016 a 2018, utilizaram-se os bancos históricos do Sistema de Informação de Agravos de Notificação, Sinan Web Influenza. Para 2020 a 2022, foram empregados os registros do Sistema de Informação da Vigilância Epidemiológica da Gripe, SIVEP-Gripe. Essa distinção foi necessária porque o Sinan Web Influenza foi o sistema oficial de registro de SRAG até 2018, enquanto o SIVEP-Gripe passou a concentrar esses registros a partir de 2019 (Brasil, 2026a; Brasil, 2026b).

Consideraram-se as notificações de SRAG registradas em cada mês, segundo data de início dos sintomas e município de residência. A definição operacional do desfecho seguiu a lógica de vigilância de síndrome respiratória grave, reconhecendo que esse agrupamento pode envolver influenza, SARS-CoV-2, vírus sincicial respiratório, outros vírus respiratórios e casos sem etiologia identificada (Fitzner et al., 2018).

Inicialmente, os registros foram organizados por município, mês e ano. Em seguida, procedeu-se à agregação dos valores mensais por

macrorregião. Registros duplicados, inconsistentes ou sem informação suficiente para localização territorial e temporal foram excluídos antes da composição do painel analítico. A qualidade variável dos sistemas de notificação foi reconhecida como fonte potencial de imprecisão, sobretudo em períodos de pressão assistencial e vigilância intensificada durante a pandemia (Ribas et al., 2022).

2.4. Dados Meteorológicos

Os indicadores meteorológicos foram obtidos a partir de dados históricos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, INMET. Foram consideradas estações meteorológicas situadas nos municípios incluídos na base epidemiológica e vinculadas à respectiva macrorregião. Para cada mês, os dados válidos das estações foram agregados de modo a representar a condição meteorológica média regional do período analisado.

A análise incluiu dias com precipitação, precipitação total, pressão atmosférica, temperatura média, velocidade máxima do vento e velocidade média do vento. Registros meteorológicos ausentes, impossíveis ou incompatíveis com a unidade de medida das demais observações foram tratados antes da agregação mensal. Apenas combinações mês, ano e macrorregião com informações disponíveis para todas as variáveis do modelo foram mantidas no painel final.

Essa estratégia permitiu construir indicadores regionais comparáveis, sem pressupor que uma estação isolada representasse integralmente a diversidade microclimática de sua macrorregião. As limitações decorrentes da distribuição desigual das estações e da agregação territorial foram consideradas na interpretação dos

achados (Ferreira; Mello, 2005; Instituto Nacional de Meteorologia, 2026).

2.5. Variáveis do Estudo

O desfecho foi o número mensal de notificações de SRAG por macrorregião. As variáveis explicativas corresponderam a dias com precipitação, DP, precipitação total, PT, pressão atmosférica, PA, temperatura média, TM, velocidade máxima do vento, VMA, e velocidade média do vento, VME.

DP e PT foram incluídas para captar dimensões distintas da pluviosidade. A primeira expressou a frequência de dias com ocorrência de precipitação, enquanto a segunda representou o volume acumulado de chuva no mês. PA, TM, VMA e VME foram analisadas como indicadores meteorológicos contínuos, agregados no nível regional mensal.

2.6. Análise Descritiva por Quartis

A distribuição das condições meteorológicas foi inicialmente explorada por quartis. Os quartis foram calculados separadamente dentro de cada combinação macrorregião e ano, considerando os 12 meses disponíveis em cada estrato. Desse modo, cada quartil correspondeu a uma posição relativa na distribuição anual da própria região, e não a uma faixa absoluta comparável entre todas as macrorregiões ou anos.

Foram descritas as faixas meteorológicas nas quais se concentrou maior frequência relativa de notificações de SRAG. Esses resultados foram utilizados exclusivamente para caracterização descritiva dos padrões mensais. Em consequência, os quartis não foram

interpretados como limiares epidemiológicos, pontos de corte, marcadores universais de risco ou instrumentos de previsão.

2.7. Correlações de Spearman

Associações monotônicas entre notificações mensais de SRAG e as variáveis meteorológicas foram examinadas pelo coeficiente de correlação de Spearman. As análises foram realizadas por Brasil, macrorregião, ano e período selecionado. Nas matrizes anuais e nas matrizes referentes aos dois triênios, cada correlação foi baseada em 12 posições mensais.

Para as análises brasileiras, os valores mensais das macrorregiões foram agregados por média aritmética, produzindo um indicador nacional mensal para cada variável. Nos triênios, foram calculadas médias mensais referentes aos três anos de cada janela temporal, preservando 12 valores correspondentes aos meses do calendário.

Apresentaram-se coeficientes de correlação, valores de p não ajustados e valores corrigidos pelo procedimento de Benjamini-Hochberg, considerando as seis correlações entre notificações de SRAG e indicadores meteorológicos em cada matriz. Os resultados foram compreendidos como exploratórios, em razão do reduzido número de observações temporais em cada estrato.

2.8. Regressão Binomial Negativa

A associação ajustada entre condições meteorológicas e notificações mensais de SRAG foi estimada por regressão binomial negativa com função de ligação logarítmica. Essa escolha foi adotada devido à natureza de contagem do desfecho e à presença de sobredispersão. Estratégias de modelagem de séries de doenças infecciosas devem

considerar, simultaneamente, sobredispersão, sazonalidade, autocorrelação e possíveis estruturas temporais complexas (Imai et al., 2015).

No modelo nacional, foram incluídas as 360 observações do painel. As variáveis meteorológicas contínuas foram centralizadas pela média global antes da estimação dos termos de interação, conforme a expressão ($X_c = X - \bar{X}$). O modelo incluiu VMA, VME, TM, PA, DP, PT, macrorregião, ano e as interações VMA $\times$ TM, TM $\times$ PA e VMA $\times$ PA.

A especificação geral foi expressa como:

$$\log[E(SRAG_{m,a,r})] = \beta_0 + \beta_1 VMA_c + \beta_2 VME_c + \beta_3 TM_c + \beta_4 PA_c + \beta_5 DP_c + \beta_6 PT_c + \beta_7 (VMA_c \times TM_c) + \beta_8 (TM_c \times PA_c) + \beta_9 (VMA_c \times PA_c) + \gamma_r + \delta_a$$

Na expressão, (m) representa o mês, (a) o ano e (r) a macrorregião. Centro-Oeste e 2016 foram definidos como categorias de referência. A interpretação dos efeitos principais foi condicionada às demais variáveis do modelo e aos termos de interação. Portanto, os coeficientes meteorológicos não foram tratados como efeitos isolados.

Serão apresentados coeficientes beta, erros-padrão, razões de taxas de incidência, IRR, intervalos de confiança de 95%, IC95%, e valores de p. A adequação do ajuste será examinada por meio de deviance nula e residual, AIC, log-verossimilhança e parâmetro theta. Na parametrização adotada, theta integra a estrutura de variância da distribuição binomial negativa, definida por ($Var(Y) = \mu + \mu^2/\theta$).

Colinearidade entre os preditores será avaliada pelo fator de inflação da variância. A dependência temporal dos resíduos será examinada por funções de autocorrelação e testes de Ljung-Box. Efeitos de mês do calendário serão incorporados como controle de sazonalidade, e a interpretação final considerará os diagnósticos do modelo, não apenas a significância estatística dos coeficientes.

2.9. Análises Regionais e de Sensibilidade

Modelos binomiais negativos estratificados serão estimados para cada macrorregião, utilizando as 72 observações mensais de cada painel regional. Esses modelos incluirão as seis variáveis meteorológicas e o ano como variável de ajuste, tendo 2016 como referência.

A heterogeneidade regional será examinada formalmente por meio de termos de interação entre macrorregião e variáveis meteorológicas no modelo nacional. Comparações entre modelos aninhados serão realizadas por teste de razão de verossimilhança. Os modelos estratificados serão interpretados como análise complementar de padrões regionais, não como prova autônoma de diferença estatística entre regiões.

Uma análise de sensibilidade será conduzida com offset para a população anual estimada de cada macrorregião. Essa etapa avaliará se as associações observadas para contagens absolutas permanecem semelhantes quando considerada a dimensão populacional regional. Nenhum dos modelos será apresentado como ferramenta preditiva ou como base suficiente para antecipar demanda assistencial.

2.10. Aspectos Éticos

Foram utilizados exclusivamente dados secundários, públicos, anonimizados e agregados, sem identificação individual dos participantes. Por essa razão, o estudo foi dispensado de apreciação por Comitê de Ética em Pesquisa, em conformidade com a Resolução nº 510, de 7 de abril de 2016, do Conselho Nacional de Saúde (Brasil, 2016).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização do Painel Analítico

A base analítica reuniu 360 observações mensais, distribuídas entre as cinco macrorregiões brasileiras e os seis anos selecionados. Cada região contribuiu com 72 registros, correspondentes aos 12 meses de 2016, 2017, 2018, 2020, 2021 e 2022. Todas as combinações previstas de mês, ano e macrorregião apresentaram informações disponíveis para as variáveis incluídas na análise.

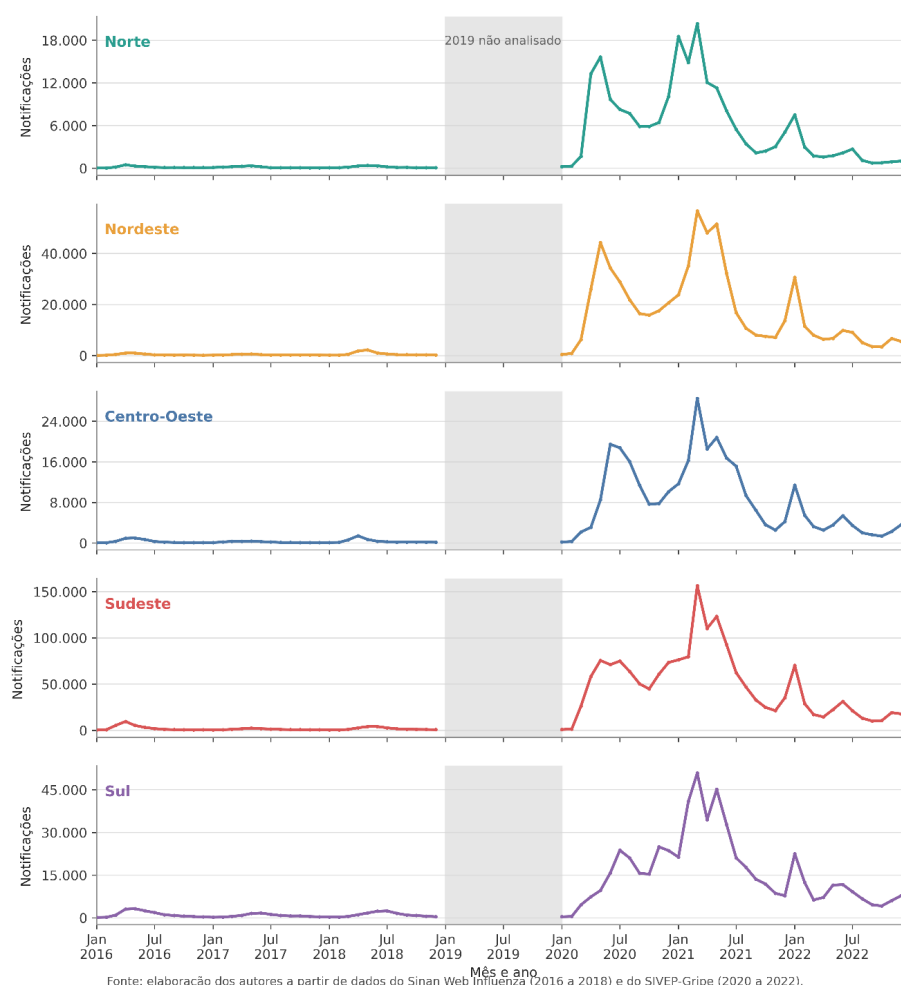
No período estudado, foram registradas 3.619.741 notificações de SRAG. O Sudeste concentrou 1.800.771 registros, equivalente a 49,7% do total, seguido pelo Nordeste, com 666.366 notificações, e pelo Sul, com 615.128. Centro-Oeste e Norte apresentaram 315.421 e 222.055 notificações, respectivamente. Essas diferenças expressam a distribuição absoluta dos registros e não equivalem a comparações diretas de risco populacional entre as macrorregiões.

A distribuição anual revelou 54.380 notificações em 2016, 29.580 em 2017, 47.727 em 2018, 1.186.581 em 2020, 1.738.614 em 2021 e 562.859 em 2022. Os anos pandêmicos concentraram, portanto, a maior parcela das notificações, com máximo em 2021.

3.2. Séries Temporais de Notificações e Variáveis Meteorológicas

A série temporal evidenciou padrões regionais distintos antes da pandemia e aumento expressivo das notificações a partir de 2020. Embora todas as macrorregiões tenham apresentado elevação no período pandêmico, a intensidade, a duração e a posição dos picos mensais variaram entre os territórios.

Figura 1. Notificações mensais de síndrome respiratória aguda grave por macrorregião brasileira, 2016 a 2018 e 2020 a 2022.



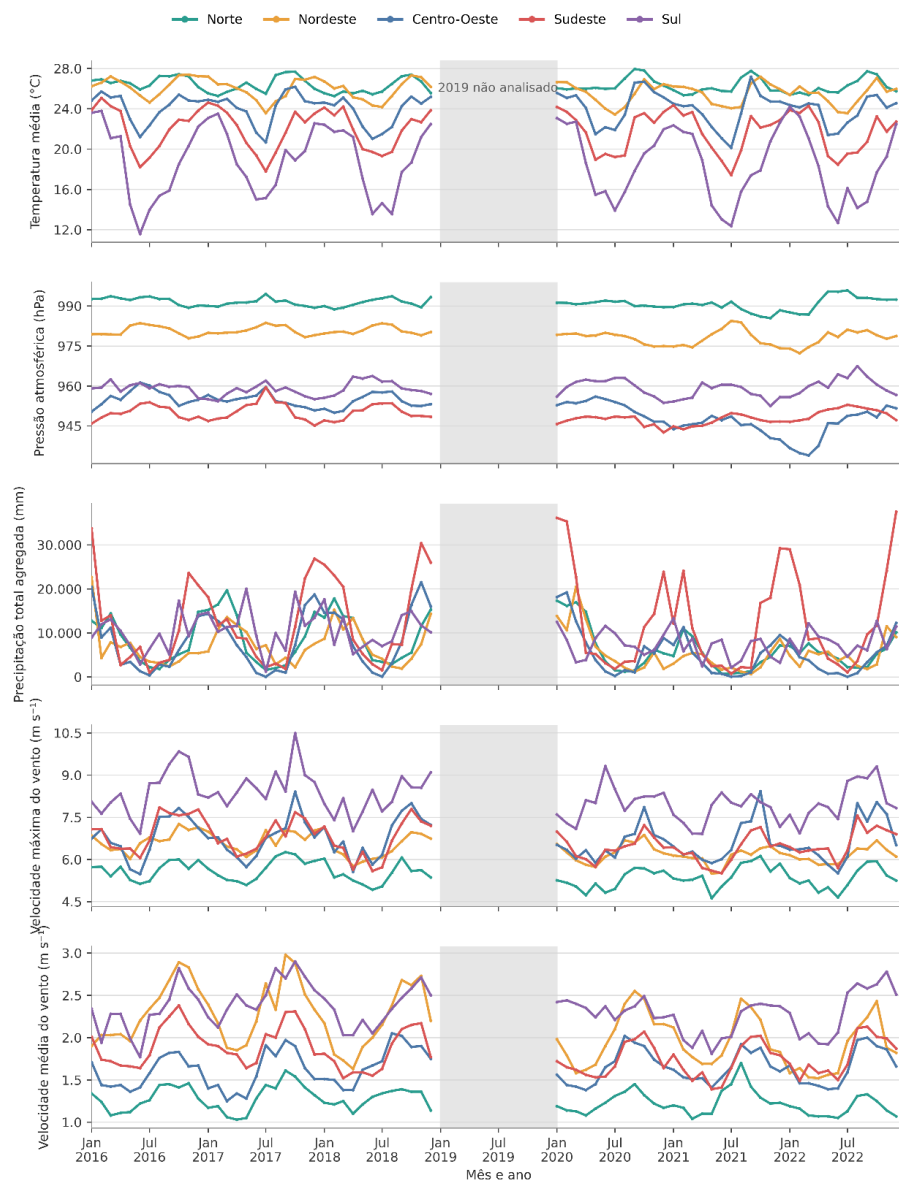
Conforme a Figura 1, as séries mensais exibem perfis sazonais e magnitudes territorialmente distintos, com ruptura expressiva entre os triênios analisados. A elevação das notificações entre 2020 e 2022 coincidiu com a emergência e a ampla circulação do SARS-CoV-2, em contexto no qual a elevada suscetibilidade populacional reduziu o peso relativo que fatores climáticos poderiam exercer sobre a dinâmica epidêmica inicial (Baker et al., 2020). Por essa razão, o

padrão pandêmico não deve ser interpretado como efeito isolado das condições meteorológicas.

Medidas de contenção, mudanças de mobilidade e progressiva vacinação também reconfiguraram a exposição, a circulação viral e a demanda por cuidado em saúde (Hale et al., 2021; Victora et al., 2021). Além disso, por se tratar de notificações de SRAG, as curvas podem incorporar alterações na busca por atendimento, na sensibilidade da vigilância e nas práticas de registro, o que impõe cautela à comparação direta entre os dois períodos.

Perfis meteorológicos também diferiram entre as macrorregiões. Temperatura média, pressão atmosférica, precipitação e velocidades do vento apresentaram amplitudes e ciclos mensais próprios, compatíveis com a diversidade climática do território brasileiro.

Figura 2. Perfis mensais de temperatura média, pressão atmosférica, precipitação e velocidades máxima e média do vento por macrorregião e período analisado.



Fonte: elaboração dos autores a partir de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Examinados conjuntamente, os perfis da Figura 2 revelam que temperatura média, pressão atmosférica, precipitação total e velocidades do vento assumem amplitudes, sazonalidades e combinações distintas entre as macrorregiões. Valores absolutos semelhantes, portanto, não ocupam necessariamente a mesma posição relativa dentro de cada regime climático, nem possuem significado epidemiológico equivalente. Essa distinção é decisiva em um país cuja circulação atmosférica e os padrões de chuva variam conforme fatores geográficos, continentais e oceânicos, especialmente nas regiões tropicais e semiáridas (Nimer, 1989; Molion; Bernardo, 2002; Ferreira; Mello, 2005).

Tal diversidade também problematiza explicações lineares para a sazonalidade das infecções respiratórias, pois os efeitos ambientais dependem da interação entre condições meteorológicas, circulação viral, suscetibilidade populacional e formas socialmente situadas de exposição (Tamerius et al., 2013; Moriyama; Hugentobler; Iwasaki, 2020). Por essa razão, a heterogeneidade visualizada fundamentou as análises estratificadas por macrorregião e tornou metodologicamente inadequada uma interpretação climática nacional uniforme.

3.3. Faixas Meteorológicas Intra Região e Ano

A análise descritiva por quartis identificou recorrência de notificações em faixas relativas específicas de variáveis meteorológicas. VMA e VME apresentaram ocorrência frequente no primeiro quartil em diferentes macrorregiões, enquanto temperatura, pressão e precipitação mostraram distribuição mais dependente do contexto regional e do ano analisado.

Tabela 1. Faixas meteorológicas associadas à maior concentração relativa de notificações de síndrome respiratória aguda grave nas macrorregiões brasileiras, 2016 a 2018 e 2020 a 2022.

Macrorregião	Variável meteorológica	Posição quartílica	Recorrência da maior concentração relativa	Faixa absoluta observada nos anos recorrentes
Centro-Oeste	Temperatura média	Q1	4/6 anos	20,13 a 23,73 °C

	Velocidade máxima do vento	Q1	4/6 anos	5,48 a 6,35 m s ⁻¹
	Velocidade média do vento	Q1	4/6 anos	1,25 a 1,52 m s ⁻¹
Nordeste	Pressão atmosférica	Q3	4/6 anos	977,00 a 982,01 hPa
	Velocidade máxima do vento	Q1	4/6 anos	5,50 a 6,37 m s ⁻¹
Norte	Pressão atmosférica	Q3	4/6 anos	989,59 a 992,88 hPa
	Velocidade máxima do vento	Q1	4/6 anos	4,73 a 5,27 m s ⁻¹
	Velocidade média do vento	Q1	4/6 anos	1,03 a 1,21 m s ⁻¹
Sudeste	Velocidade máxima do vento	Q1	4/6 anos	5,51 a 6,39 m s ⁻¹
	Velocidade média do vento	Q1	5/6 anos	1,39 a 1,80 m s ⁻¹
Sul	Temperatura média	Q1	4/6 anos	11,58 a 16,44 °C
	Pressão atmosférica	Q4	4/6 anos	959,44 a 963,74 hPa
	Velocidade média do vento	Q2	4/6 anos	2,05 a 2,50 m s ⁻¹

Nota: Em cada estrato macrorregião e ano, as notificações mensais foram somadas por posição quartílica. A tabela inclui apenas variáveis cuja mesma posição quartílica concentrou a maior soma em pelo menos quatro dos seis anos analisados. As faixas expressam os valores observados nos anos recorrentes e não constituem limiares epidemiológicos.

Fonte: Elaboração dos autores a partir de dados do Sinan Web Influenza, 2016 a 2018, SIVEP-Gripe, 2020 a 2022, e Instituto Nacional de Meteorologia.

Os quartis apresentados na Tabela 1 exprimem posições relativas na distribuição de cada variável dentro de cada estrato macrorregião e ano. Por isso, uma mesma velocidade do vento, temperatura ou pressão atmosférica pode ocupar posições quartílicas distintas conforme se modificam as condições ambientais de cada período e território. A recorrência de VMA ou VME em Q1 deve ser interpretada apenas como maior concentração relativa de notificações nos meses de menor velocidade externa do vento naquele contexto analítico específico. Não representa limiar meteorológico universal, ponto de corte epidemiológico ou evidência de causalidade.

Essa cautela é indispensável diante da diversidade climática brasileira e da natureza multifatorial da sazonalidade das infecções respiratórias (Nimer, 1989; Ferreira; Mello, 2005; Tamerius et al., 2013; Moriyama; Hugentobler; Iwasaki, 2020). Além disso, a velocidade do vento registrada em estações meteorológicas não estima diretamente a ventilação de ambientes internos, influenciada por características arquitetônicas, ocupação e fluxos de ar locais (Li et al., 2007; Wang et al., 2021).

3.4. Correlações Exploratórias

As correlações de Spearman evidenciaram variação temporal e regional nas associações entre notificações de SRAG e indicadores meteorológicos. No Brasil, o primeiro triênio apresentou correlações fortes com PA, ($\rho = 0,77$), e TM, ($\rho = -0,76$). No segundo triênio, VMA, ($\rho = -0,94$), e VME, ($\rho = -0,83$), apresentaram as maiores magnitudes.

Tabela 2. Correlações exploratórias de maior magnitude entre notificações de síndrome respiratória aguda grave e variáveis meteorológicas, segundo macrorregião, ano e período analisado.

Ano ou período	n	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste
2016	12	PA ($p = 0,75$; pBH = 0,033)	NR	NR	NR
2017	12	VMA ($p = -0,70$; pBH = 0,053)	VMA ($p = -0,74$; pBH = 0,038)	VMA ($p = -0,87$; pBH = 0,003)	PA ($p = 0,71$; pBH = 0,046)
2018	12	NR	VMA ($p = -0,88$; pBH = 0,001)	NR	PT ($p = 0,88$; pBH = 0,001)

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/variaveis-meteorologicas-e-notificacoes-de-sindrome-respiratoria-aguda-grave-no-brasil-analise-ecologica-por-macrorregioes?noblockage>

Nota: Cada célula apresenta somente a variável com maior magnitude de correlação no respectivo estrato, desde que $|p| \geq 0,70$ ou $p \leq 0,05$. NR indica ausência de correlação com essa magnitude. pBH corresponde ao valor de p ajustado pelo procedimento de Benjamini e Hochberg para os 240 testes de correlação entre notificações e variáveis meteorológicas. Nos triênios, as correlações

foram calculadas com médias mensais dos três anos, mantendo $n=12$.

Legenda: PA = pressão atmosférica; PT = precipitação total; TM = temperatura média; VMA = velocidade máxima do vento; VME = velocidade média do vento.

Fonte: Elaboração dos autores a partir de dados do Sinan Web Influenza, SIVEP-Gripe e Instituto Nacional de Meteorologia.

Com $n=12$ em todos os estratos temporais, a Tabela 2 sintetiza a correlação de maior magnitude entre as notificações mensais de SRAG e as variáveis meteorológicas em cada macrorregião e período analisado. O quadro principal apresenta o coeficiente de Spearman e o valor de p ajustado pelo procedimento de Benjamini e Hochberg. Nenhuma associação exibiu direção ou persistência uniforme entre regiões e períodos.

No segundo triênio, VMA e VME concentraram as correlações de maior magnitude em várias macrorregiões, ao passo que TM, PA, DP e PT se destacaram em anos ou contextos regionais específicos. Tais resultados descrevem relações monotônicas em séries mensais reduzidas e devem ser interpretados como achados exploratórios. Portanto, não foram utilizados como evidência de efeito independente, nem substituem as estimativas ajustadas da regressão binomial negativa multivariada.

3.5. Modelo Binomial Negativo Nacional

No modelo binomial negativo nacional, VMA, VME, TM e PA apresentaram associações estatisticamente significativas com as notificações mensais de SRAG. VMA apresentou ($\beta = -0,557$), IRR = 0,573 e $p < 0,001$. Para VME, observaram-se ($\beta = -0,589$), IRR =

0,555 e $p = 0,005$. TM apresentou ($\beta = -0,072$), IRR = 0,930 e $p = 0,011$, enquanto PA apresentou ($\beta = -0,049$), IRR = 0,952 e $p < 0,001$.

DP e PT não apresentaram associação independente no modelo nacional. Por outro lado, VMA $\times$ TM, TM $\times$ PA e VMA $\times$ PA apresentaram interações negativas e estatisticamente significativas. Esses resultados indicam que a associação estimada para cada variável meteorológica depende dos valores assumidos pelas demais variáveis envolvidas na interação.

Tabela 3. Associação entre variáveis meteorológicas e notificações mensais de síndrome respiratória aguda grave no Brasil, segundo regressão binomial negativa multivariada.

Grupo	Termo	β	EP	$\exp(\beta)$	IC95% $\exp(\beta)$
Meteorológica	VMAc	-0,55730	0,10370	0,573	0,467 a 0,702
Meteorológica	VMEc	-0,58940	0,20920	0,555	0,368 a 0,836
Meteorológica	TMc	-0,07205	0,02840	0,930	0,880 a 0,984
Meteorológica	PAc	-0,04938	0,01248	0,952	0,929 a 0,975

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/variaveis-meteorologicas-e-notificacoes-de-sindrome-respiratoria-aguda-grave-no-brasil-analise-ecologica-por-macrorregioes?noblockage>

Nota: Centro-Oeste e 2016 constituem as categorias de referência. Variáveis contínuas foram centralizadas antes da estimação das

interações. Os efeitos principais devem ser interpretados quando as variáveis que participam das interações estão em seus valores médios. Para os termos de interação, $\exp(\beta)\exp(\beta)$ não é apresentado isoladamente, pois seu significado depende da combinação entre as variáveis envolvidas. IC95% calculado por $\beta \pm 1,96 \times EP \pm 1,96 \times EP$.

Legenda: DPc = dias com precipitação centralizados; PTc = precipitação total centralizada; PAc = pressão atmosférica centralizada; TMc = temperatura média centralizada; VMAc = velocidade máxima do vento centralizada; VMEc = velocidade média do vento centralizada.

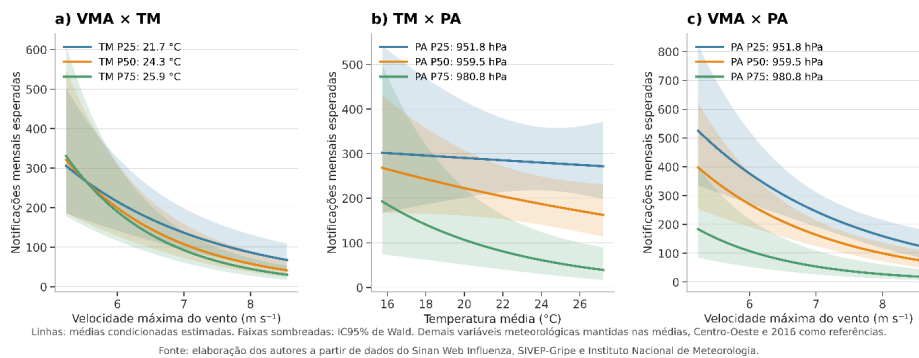
Fonte: Elaboração dos autores a partir de dados do Sinan Web Influenza, SIVEP-Gripe e Instituto Nacional de Meteorologia.

No modelo nacional, a deviance residual foi de 383,41, em comparação à deviance nula de 2.954,05, com 341 graus de liberdade residuais, AIC de 6.215,4 e parâmetro θ de 2,447. Após o ajuste simultâneo, VMAc, VMEc, TMc e PAc apresentaram associações negativas e estatisticamente significativas com as notificações mensais de SRAG, enquanto DPc e PTc não permaneceram associados no modelo. Os três termos de interação também foram significativos, indicando que os efeitos das variáveis meteorológicas não são aditivos e que os efeitos principais devem ser interpretados condicionalmente aos valores médios das demais variáveis centradas.

Em relação ao Centro-Oeste, Nordeste, Sudeste e Sul apresentaram maiores contagens esperadas no modelo, ao passo que o Norte não diferiu estatisticamente da categoria de referência. Os anos de 2020, 2021 e 2022 também exibiram coeficientes positivos em comparação a 2016. Tais estimativas expressam razões de contagens

condicionadas ao modelo, $\exp(\beta)\exp(\backslash\beta)$, e não taxas populacionais, riscos individuais ou efeitos causais atribuíveis isoladamente às condições meteorológicas.

Figura 3. Efeitos marginais estimados das interações entre velocidade máxima do vento, temperatura média e pressão atmosférica sobre as notificações mensais de síndrome respiratória aguda grave no modelo nacional.



A Figura 3 apresenta médias condicionadas estimadas de notificações mensais de SRAG para diferentes combinações de VMA, TM e PA, acompanhadas de IC95%. As curvas evidenciam que os efeitos principais não podem ser interpretados isoladamente, pois a associação estimada de uma variável meteorológica varia conforme os níveis das demais variáveis incluídas nos termos de interação. Essas estimativas foram obtidas com as variáveis não focalizadas mantidas em seus valores médios e com Centro-Oeste e 2016 como categorias de referência. Portanto, expressam contagens esperadas sob condições específicas do modelo, sem constituir previsão individual ou evidência causal.

3.6. Modelos Estratificados por Macrorregião

Os modelos regionais revelaram padrões associativos distintos. No Centro-Oeste, VMA permaneceu negativamente associada às notificações de SRAG, com $(\backslash\beta = -0,659)$ e $p = 0,004$. O Nordeste

apresentou associações negativas com VMA, ($\beta = -1,282$), TM, ($\beta = -0,310$), e PA, ($\beta = -0,174$), todas com $p < 0,001$.

No Norte, VME apresentou a associação negativa de maior magnitude, com ($\beta = -3,813$) e $p < 0,001$, acompanhada por PA, com ($\beta = -0,097$) e $p = 0,017$. No Sudeste, VMA apresentou ($\beta = -0,819$) e $p = 0,002$, enquanto PT apresentou associação negativa de pequena magnitude, ($\beta = -0,000056$) e $p = 0,032$. Na região Sul, VME, ($\beta = -1,276$), e TM, ($\beta = -0,114$), permaneceram negativamente associadas às notificações, com $p = 0,005$ e $p = 0,001$, respectivamente.

Tabela 4. Estimativas dos modelos binomiais negativos estratificados por macrorregião brasileira, 2016 a 2018 e 2020 a 2022.

Macrorregião	Variável meteorológica	β	$\exp(\beta)$	IC95% $\exp(\beta)$
Centro-Oeste	VMAc	-0,65930	0,517	0,331 a 0,808
Nordeste	VMAc	-1,28200	0,277	0,141 a 0,546
	TMc	-0,30990	0,734	0,618 a 0,871
	PAc	-0,17400	0,840	0,779 a 0,911

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/variaveis-meteorologicas-e-notificacoes-de-sindrome-respiratoria-aguda-grave-no-brasil-analise-ecologica-por-macrorregioes?noblockage>

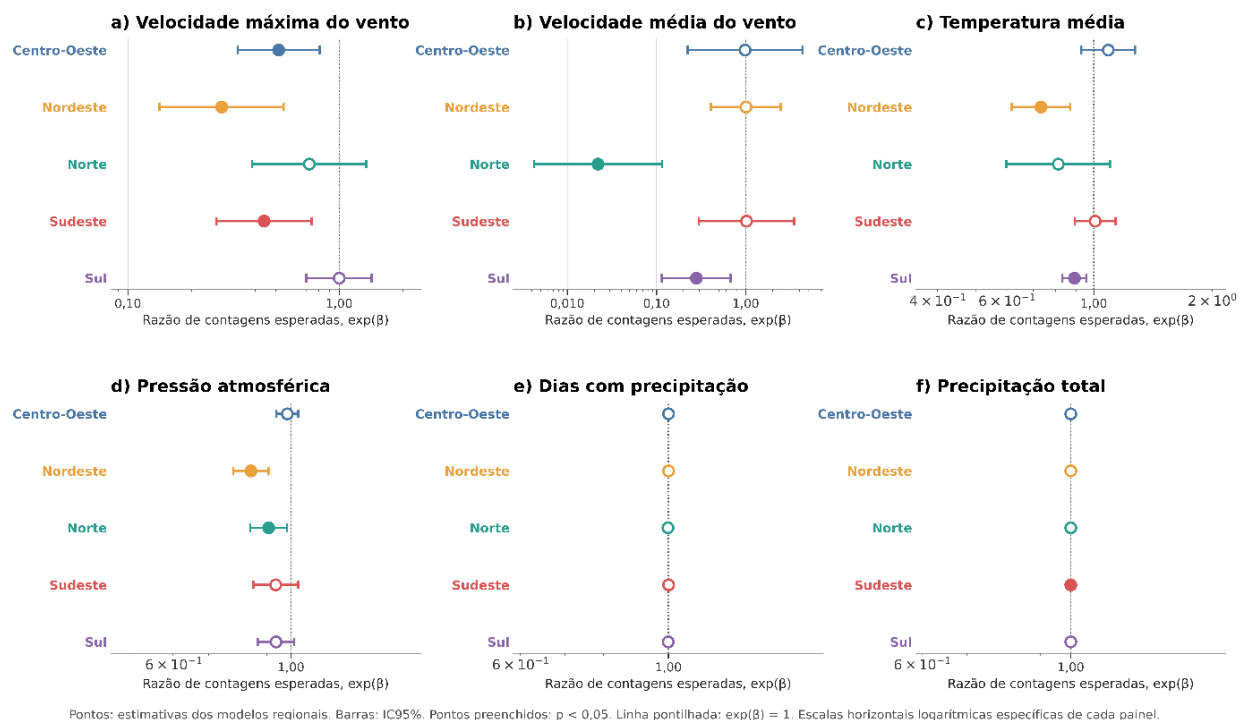
Legenda: PAc = pressão atmosférica centralizada; PTc = precipitação total centralizada; TMc = temperatura média centralizada; VMAc =

velocidade máxima do vento centralizada; $VMEc$ = velocidade média do vento centralizada; θ = parâmetro estimado da distribuição binomial negativa.

Fonte: Elaboração dos autores a partir de dados do Sinan Web Influenza, SIVEP-Gripe e Instituto Nacional de Meteorologia.

A Tabela 4 sintetiza os coeficientes β , as razões de contagens esperadas, $\exp(\beta)$, os IC95%, os valores de p e os indicadores de ajuste dos modelos estratificados por macrorregião. As estimativas meteorológicas variaram entre as macrorregiões, sugerindo configurações associativas regionalmente distintas. Contudo, diferenças de significância estatística, direção ou magnitude entre modelos regionais separados não demonstram, isoladamente, que os coeficientes sejam estatisticamente diferentes entre regiões. Essa conclusão requer teste formal de interação entre macrorregião e variáveis meteorológicas no modelo nacional.

Figura 4. Comparação dos efeitos estimados das variáveis meteorológicas nos modelos binomiais negativos estratificados por macrorregião.



Fonte: elaboração dos autores a partir de dados do Sinan Web Influenza, SIVEP-Gripe e Instituto Nacional de Meteorologia.

A Figura 4 permite comparar as razões de contagens esperadas, $\exp(\beta)$, e seus respectivos IC95% entre as macrorregiões, evidenciando convergências e contrastes nas associações estimadas para cada variável meteorológica. Ainda assim, a sobreposição ou a não sobreposição visual dos intervalos não constitui teste formal de diferença entre regiões. A interpretação de heterogeneidade regional deve, portanto, apoiar-se nas interações entre macrorregião e variáveis meteorológicas estimadas no modelo nacional.

3.7. Diagnósticos e Análises de Sensibilidade

A redução da deviance residual indicou melhora substancial do ajuste em relação ao modelo nulo. Entretanto, os diagnósticos evidenciaram colinearidade relevante na estrutura completa do modelo, sobretudo para PA, DP, PT e alguns termos territoriais. Desse modo, as estimativas foram interpretadas como efeitos condicionados às demais variáveis incluídas, e não como contribuições independentes ou isoladas de cada indicador meteorológico.

A autocorrelação de primeira ordem dos resíduos foi positiva em todas as macrorregiões, com valores aproximados entre 0,51 e 0,62. Esse achado confirmou a importância de considerar explicitamente a dependência temporal e a sazonalidade na análise e na interpretação das estimativas.

A conferência identificou oito referências que ainda não estavam mobilizadas de modo explícito nas seções já desenvolvidas: Viboud et al. (2006), Tellier et al. (2019), Morawska e Cao (2020), Marr et al. (2019), Jacob e Winner (2009), Seinfeld e Pandis (2016), Stull (1988) e Haas et al. (2021). A versão abaixo as incorpora com função argumentativa pertinente. Assim, as 32 referências do corpus passam a ser citadas entre a Introdução, os Métodos e a Discussão.

4. DISCUSSÃO

4.1. Síntese Principal dos Achados

Os resultados indicam que as notificações mensais de SRAG apresentaram associações meteorológicas condicionadas por contexto regional, período epidemiológico e interação entre variáveis ambientais. No modelo nacional, velocidade máxima do vento, velocidade média do vento, temperatura média e pressão atmosférica permaneceram associadas às contagens mensais após ajuste simultâneo, enquanto dias com precipitação e precipitação total não mantiveram associação independente. Essa configuração questiona explicações sustentadas por um único fator climático e reforça a natureza multifatorial da sazonalidade respiratória (Tamerius et al., 2013; Moriyama et al., 2020). Como sintetizado na Tabela 3 e na Figura 3, as associações estimadas no modelo nacional

foram condicionadas pelas interações entre velocidade máxima do vento, temperatura média e pressão atmosférica.

As interações entre velocidade máxima do vento, temperatura média e pressão atmosférica demonstram que os efeitos estimados não são constantes. Por conseguinte, o sentido e a magnitude da associação de uma variável dependem dos níveis das demais, o que limita leituras lineares dos coeficientes principais. Mais do que identificar um elemento ambiental isoladamente determinante, o modelo revela combinações meteorológicas associadas a diferentes contagens esperadas de notificações.

Cumpramos ressaltar que tais resultados não permitem atribuir causalidade às condições meteorológicas. A unidade de análise foi a macrorregião em cada mês e ano, de modo que as estimativas descrevem associações ecológicas entre séries agregadas. Etiologias distintas, características demográficas, acesso aos serviços, práticas diagnósticas, cobertura da vigilância e transformações sociais podem participar, simultaneamente, da organização observada das notificações. A literatura sobre transmissão por aerossóis oferece sustentação conceitual para a relevância do ambiente aéreo, mas não elimina a necessidade de distinguir processos físicos, medidas ambientais e mecanismos epidemiológicos efetivamente observados (Tellier et al., 2019; Wang et al., 2021).

4.2. Heterogeneidade Climato Epidemiológica Regional

A recorrência de determinadas faixas relativas em diferentes macrorregiões não significa que elas expressem o mesmo cenário climático absoluto. Temperaturas, pressões e velocidades do vento semelhantes em termos de quartil podem corresponder a regimes

atmosféricos muito distintos entre Norte, Nordeste, Centro Oeste, Sudeste e Sul. Os quartis empregados neste estudo devem, portanto, ser compreendidos como posições relativas dentro de cada combinação de região e ano, sem equivalência com limiares universais de risco. A Tabela 1 evidencia esse ponto ao mostrar que a recorrência de uma mesma posição quartílica ocorreu em faixas absolutas distintas entre as macrorregiões, enquanto a Figura 4 mostra a variação das estimativas ajustadas nos modelos estratificados.

A diversidade climática brasileira torna particularmente problemática a importação de padrões sazonais formulados para áreas temperadas. Nimer (1989) descreve um território marcado pela coexistência de domínios equatoriais, tropicais e subtropicais, enquanto Ferreira e Mello (2005) e Molion e Bernardo (2002) evidenciam a complexidade dos sistemas atmosféricos e pluviométricos que atuam, sobretudo, sobre o Nordeste. Nesse horizonte, a variação regional identificada nos modelos não constitui ruído estatístico, mas expressão possível de contextos ambientais e epidemiológicos não intercambiáveis.

Processos atmosféricos também variam conforme a estrutura da camada limite, a circulação local, o relevo, a cobertura da superfície e a passagem de sistemas sinóticos. Stull (1988) demonstra que a dispersão e a mistura de massas de ar próximas à superfície são fenômenos dependentes de condições meteorológicas e topográficas específicas. Seinfeld e Pandis (2016), por sua vez, ressaltam que o comportamento de partículas e gases atmosféricos decorre de processos de transporte, diluição e transformação que não se resumem à velocidade do vento registrada em uma estação. Essas referências ajudam a compreender por que médias regionais

não representam integralmente os microclimas e as exposições reais da população.

Estudos internacionais também indicam que a sazonalidade dos vírus respiratórios não segue padrão único. Tamerius et al. (2013) identificaram preditores ambientais distintos para epidemias de influenza em contextos tropicais e temperados. De modo convergente, Moura et al. (2009) demonstraram que a sazonalidade do vírus sincicial respiratório no Brasil apresenta variações territoriais relevantes. A SRAG, por reunir múltiplas etiologias e condições clínicas, tende a ampliar essa complexidade, exigindo cautela diante de interpretações nacionais homogêneas.

Embora os modelos estratificados revelem perfis associativos distintos, diferenças visuais, de magnitude ou de significância estatística entre macrorregiões não comprovam, isoladamente, que seus coeficientes sejam estatisticamente diferentes. Essa questão depende do teste formal de interação entre macrorregião e variáveis meteorológicas. Por essa razão, a expressão heterogeneidade climato epidemiológica deve designar uma hipótese analiticamente examinada, não uma explicação causal já encerrada.

4.3. Temperatura, Pressão, Precipitação e Vento

A associação negativa entre temperatura média e notificações de SRAG no modelo nacional é compatível com evidências que relacionam condições térmicas a processos virais e respostas do hospedeiro, mas não pode ser transposta diretamente para todas as infecções incluídas no desfecho. Em experimento com cobaias, Lowen et al. observaram que “both cold and dry conditions favor transmission” (Lowen et al., 2007, p. 1470). Trata-se, contudo, de

achado experimental sobre influenza, sob condições controladas, e não de demonstração de que a temperatura tenha produzido, por si só, a variação das notificações brasileiras de SRAG.

Eccles (2002) e Foxman et al. (2015) discutem mecanismos pelos quais condições térmicas podem relacionar-se à fisiologia das vias aéreas, à resposta imune e à replicação viral. Moriyama et al. (2020) advertem, entretanto, que a sazonalidade respiratória resulta da articulação entre ambiente externo, ambiente interno, comportamento humano, imunidade e propriedades dos agentes infecciosos. Essa formulação situa adequadamente os resultados do presente estudo. A temperatura mensal agregada constitui uma medida ambiental contextual, incapaz de representar a exposição individual ou o microclima de domicílios, escolas, transportes e serviços de saúde.

A pressão atmosférica também permaneceu associada às contagens no modelo nacional e em alguns modelos regionais. Entretanto, esse resultado não deve ser tratado como evidência de mecanismo biológico direto. Pressão, temperatura, chuva, circulação atmosférica, umidade e qualidade do ar integram sistemas físicos interdependentes. Jacob e Winner (2009) mostram que condições meteorológicas influenciam processos atmosféricos com potencial para alterar a concentração e o transporte de poluentes. Como essas variáveis não foram incluídas no modelo, parte da associação estimada para a pressão pode refletir configurações ambientais concomitantes não mensuradas.

Quanto à precipitação, a ausência de associação independente no modelo multivariado não elimina sua relevância ambiental. Dias com chuva e precipitação total podem atuar por vias indiretas,

relacionadas à mobilidade, ao confinamento em ambientes fechados, à umidade e à dinâmica regional das massas de ar. Du Prel et al. (2009), Paynter (2015) e Yusuf et al. (2007) apontam que as relações entre condições meteorológicas e infecções respiratórias variam conforme agente etiológico, localidade, escala temporal e conjunto de covariáveis considerado.

A heterogeneidade temporal dessas relações já se manifesta na Tabela 2, na qual as associações exploratórias de maior magnitude variaram quanto à direção, à variável meteorológica envolvida e ao período analisado. Como cada matriz contém apenas 12 observações mensais, esses resultados devem ser compreendidos como descrições exploratórias de padrões monotônicos, sem substituir as estimativas ajustadas do modelo multivariado.

A ausência de umidade relativa no banco analítico merece destaque. Marr et al. (2019) demonstram que a umidade pode afetar sobrevivência viral, comportamento de gotículas e dinâmica de aerossóis, mas seus efeitos dependem de condições físicas e biológicas específicas. Portanto, a ausência dessa variável impede avaliar se parte das associações atribuídas à temperatura, à pressão ou à precipitação representa, na realidade, relações mais amplas entre condições atmosféricas e umidade. Essa lacuna não invalida os resultados, mas restringe sua interpretação mecanística.

Velocidade máxima e velocidade média do vento exibiram associação negativa no modelo nacional, com configurações regionais distintas. Esse achado não autoriza substituir vento externo por ventilação de edificações. Velocidade registrada por estações meteorológicas expressa circulação atmosférica superficial em pontos específicos do território, ao passo que a ventilação

interna depende de arquitetura, ocupação, abertura de portas e janelas, sistemas mecânicos, filtragem e padrões de circulação do ar.

Li et al. advertem que “there have been few recent studies demonstrating a definitive association” entre a transmissão de infecções aéreas e a ventilação de edifícios (Li et al., 2007, p. 2). A ressalva é decisiva para este artigo. A literatura sobre transmissão aérea, incluindo Morawska e Cao (2020), Morawska e Milton (2020), Prather et al. (2020), Greenhalgh et al. (2021) e Morawska et al. (2021), oferece base conceitual para reconhecer a importância do ambiente aéreo na disseminação de agentes respiratórios. Todavia, os dados analisados não mediram renovação de ar em ambientes internos, concentração de aerossóis nem exposição individual. O vento deve permanecer, portanto, como indicador meteorológico externo associado às notificações, não como medida substituta de ventilação interna.

4.4. Período Pandêmico e Alteração da Composição das Notificações

Os coeficientes positivos observados para 2020, 2021 e 2022, em comparação com 2016, expressam uma ruptura epidemiológica importante nas contagens de SRAG. A pandemia modificou a circulação viral, a procura por atendimento, a capacidade diagnóstica, as regras de notificação, a mobilidade populacional, as medidas não farmacológicas e a pressão sobre os serviços de saúde. Consequentemente, o crescimento das notificações no segundo triênio não pode ser atribuído exclusivamente às condições meteorológicas. A Figura 1 torna visível que o aumento das notificações no segundo triênio ocorreu sobre estruturas sazonais e

territoriais não coincidentes, reforçando a necessidade de contextualizar os efeitos temporais estimados na Tabela 3.

Baker et al. destacaram que “high susceptibility is a core driver” da trajetória inicial da pandemia (Baker et al., 2020, p. 315). Essa advertência é particularmente pertinente para a interpretação dos resultados brasileiros. A elevada suscetibilidade inicial à COVID 19, somada à emergência de variantes, à vacinação progressiva e às mudanças nas respostas governamentais e individuais, conformou um cenário epidemiológico que não possui equivalência simples com o triênio anterior.

A experiência histórica das pandemias de influenza também demonstra que ondas epidêmicas podem assumir magnitudes e distribuições geográficas amplamente distintas conforme imunidade populacional, circulação de variantes e condições sociais. Viboud et al. (2006), ao analisarem a pandemia de influenza de 1957 a 1959, evidenciam a importância de considerar a dinâmica demográfica e temporal das epidemias antes de atribuir a variabilidade observada a fatores ambientais isolados.

Políticas de distanciamento, restrições de mobilidade, uso de máscaras e estratégias de vacinação variaram ao longo do período pandêmico e entre territórios. Hale et al. (2021) documentam a extensão internacional dessas medidas. Embora realizado em Israel, o estudo de Haas et al. (2021) também demonstra como a vacinação em larga escala pode alterar rapidamente a ocorrência de infecções, hospitalizações e mortes, aspecto relevante para compreender a instabilidade da composição das notificações no período pandêmico. Victora et al. (2021) acrescentam evidências sobre o

impacto inicial da imunização contra COVID 19 entre pessoas idosas no Brasil.

Diante desse quadro, os dois triênios devem ser interpretados como janelas analíticas deliberadamente distintas. Não se trata de série contínua entre 2016 e 2022, pois 2019 não integrou o delineamento. Tampouco é possível inferir que a pandemia tenha reorganizado, por si só, a relação entre meteorologia e SRAG. Os resultados indicam que as associações foram estimadas em contextos epidemiológicos substancialmente diferentes, o que exige leitura histórica e sanitária das séries.

4.5. Implicações para Vigilância Respiratória

A incorporação de informações meteorológicas pode contribuir para qualificar a vigilância respiratória quando integrada a indicadores epidemiológicos, laboratoriais, assistenciais e territoriais. Séries de temperatura, precipitação, pressão e circulação atmosférica podem auxiliar a contextualizar períodos de maior concentração relativa de notificações e a orientar hipóteses para investigações locais, especialmente em regiões com padrões sazonais próprios.

Essa possibilidade não equivale à existência de um sistema preditivo validado. Para que indicadores meteorológicos integrem instrumentos operacionais de vigilância, será necessário avaliar estabilidade temporal, desempenho prospectivo, capacidade de generalização regional, defasagens entre exposição e desfecho, qualidade das bases e valor incremental diante de variáveis epidemiológicas mais diretamente relacionadas à circulação viral. Sem essas etapas, qualquer uso para antecipar demanda assistencial seria prematuro.

Estratégias futuras podem combinar dados meteorológicos com positividade laboratorial, internações, circulação de agentes específicos, cobertura vacinal, mobilidade, vulnerabilidade social e disponibilidade de leitos. A principal contribuição deste estudo consiste em mostrar que uma vigilância nacional indiferenciada tende a obscurecer padrões regionais relevantes. O desafio não é apenas ampliar o número de indicadores, mas interpretar criticamente suas escalas, suas interdependências e seus limites.

4.6. Limitações e Fortalezas

Diversas limitações devem orientar a leitura dos achados. Primeiramente, o delineamento ecológico impede a inferência sobre indivíduos, domicílios ou ambientes específicos. Não é possível afirmar que pessoas expostas a determinada temperatura, pressão ou velocidade do vento apresentaram maior ou menor probabilidade de desenvolver SRAG. A agregação mensal, embora favoreça a compatibilização das bases e a análise de padrões sazonais, reduz a capacidade de examinar variações de curto prazo e defasagens diárias.

A heterogeneidade na distribuição, manutenção e completude das estações meteorológicas introduz outra fonte potencial de imprecisão. As médias regionais não representam integralmente os microclimas municipais nem as condições efetivamente experimentadas pela população. De forma semelhante, os registros de SRAG dependem da oportunidade de acesso aos serviços, da suspeição clínica, da disponibilidade de testes, das regras de vigilância e da qualidade do preenchimento das fichas, aspectos especialmente sensíveis durante a pandemia.

A composição sindrômica do desfecho também requer cautela. SRAG não equivale a influenza, COVID 19, vírus sincicial respiratório ou qualquer etiologia isolada. Reúne notificações potencialmente produzidas por diferentes agentes e mecanismos clínicos, cuja sazonalidade pode divergir. Falsey et al. (2014) e Paules e Subbarao (2017) evidenciam a diversidade clínica e epidemiológica das infecções respiratórias virais, elemento que impossibilita atribuir as associações estimadas a um patógeno específico.

Apesar dessas restrições, o estudo apresenta fortalezas relevantes: cobertura nacional, grande número de notificações, painel mensal completo com 360 observações, comparação entre macrorregiões, combinação de análise descritiva, correlações exploratórias e regressão binomial negativa multivariada. A apresentação de interações, intervalos de confiança, diagnósticos de ajuste, modelos regionais e análise de sensibilidade amplia a transparência analítica. Sobretudo, a pesquisa evita converter associações agregadas em explicações simplificadoras e sustenta uma agenda de vigilância respiratória sensível às diferenças territoriais do Brasil.

5. CONCLUSÃO

Este estudo identificou associações entre variáveis meteorológicas e notificações mensais de síndrome respiratória aguda grave nas macrorregiões brasileiras, com padrões que variaram segundo o contexto territorial, o período analisado e a combinação entre temperatura média, pressão atmosférica e velocidades do vento. A análise multivariada nacional indicou associações ajustadas para essas variáveis, enquanto os modelos estratificados e as análises descritivas evidenciaram configurações regionais distintas.

As faixas ambientais observadas nos quartis representam posições relativas dentro de cada combinação de macrorregião e ano. Por isso, não devem ser tratadas como limiares meteorológicos universais, pontos de corte epidemiológicos ou marcadores diretamente aplicáveis a todo o território brasileiro. De modo semelhante, as associações estimadas em dados agregados não estabelecem causalidade, risco individual ou mecanismos específicos de transmissão.

Os achados sustentam a necessidade de vigilância respiratória sensível à diversidade climática e epidemiológica do país. Estudos posteriores deverão incorporar maior resolução temporal e territorial, defasagens entre exposição e desfecho, identificação etiológica das notificações, umidade relativa, qualidade do ar, mobilidade, variáveis sociais e indicadores assistenciais. Somente análises prospectivas e validadas poderão definir se informações meteorológicas agregam valor operacional a estratégias regionalizadas de vigilância da SRAG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAKER, R. E. et al. Susceptible supply limits the role of climate in the early SARS-CoV-2 pandemic. *Science*, v. 369, n. 6501, p. 315-319, 2020.

BENCHIMOL, E. I. et al. The REporting of studies Conducted using Observational Routinely-collected Health Data (RECORD) Statement. *PLoS Medicine*, v. 12, n. 10, e1001885, 2015. DOI: 10.1371/journal.pmed.1001885.

BRASIL. Ministério da Saúde. Conselho Nacional de Saúde. Resolução nº 510, de 7 de abril de 2016. Brasília, DF, 2016.

BRASIL. Ministério da Saúde. SRAG 2013 a 2018: Banco de Dados de Síndrome Respiratória Aguda Grave. Portal de Dados Abertos do SUS, 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. SRAG 2019 a 2026. Portal de Dados Abertos do SUS, 2026.

DU PREL, J. B. et al. Are meteorological parameters associated with acute respiratory tract infections? *Clinical Infectious Diseases*, v. 49, n. 6, p. 861-868, 2009.

ECCLES, R. An explanation for the seasonality of acute upper respiratory tract viral infections. *Acta Oto-Laryngologica*, v. 122, n. 2, p. 183-191, 2002.

FALSEY, A. R. et al. Respiratory syncytial virus and other respiratory viral infections in older adults with moderate to severe influenza-like illness. *The Journal of Infectious Diseases*, v. 209, n. 12, p. 1873-1881, 2014.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, 2005.

FITZNER, J. et al. Revision of clinical case definitions: influenza-like illness and severe acute respiratory infection. *Bulletin of the World Health Organization*, v. 96, n. 2, p. 122-128, 2018. DOI: 10.2471/BLT.17.194514.

FOXMAN, E. F. et al. Temperature-dependent innate defense against the common cold virus limits viral replication at warm temperature

in mouse airway cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 112, n. 3, p. 827-832, 2015.

GREENHALGH, T. et al. Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. *The Lancet*, v. 397, n. 10285, p. 1603-1605, 2021.

HALE, T. et al. A global panel database of pandemic policies. *Nature Human Behaviour*, v. 5, p. 529-538, 2021.

IMAI, C. et al. Time series regression model for infectious disease and weather. *Environmental Research*, v. 142, p. 319-327, 2015. DOI: 10.1016/j.envres.2015.06.040.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, BDMEP. Brasília, DF, 2026.

LI, Y. et al. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment: a multidisciplinary systematic review. *Indoor Air*, v. 17, n. 1, p. 2-18, 2007.

LOWEN, A. C. et al. Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. *PLoS Pathogens*, v. 3, n. 10, e151, 2007.

MORAWSKA, L.; MILTON, D. K. It is time to address airborne transmission of COVID-19. *Clinical Infectious Diseases*, v. 71, n. 9, p. 2311-2313, 2020.

MORGENSTERN, H. Ecologic studies in epidemiology: concepts, principles, and methods. *Annual Review of Public Health*, v. 16, p. 61-81, 1995. DOI: 10.1146/annurev.pu.16.050195.000425.

MORIYAMA, M.; HUGENTOBLE, W. J.; IWASAKI, A. Seasonality of respiratory viral infections. Annual Review of Virology, v. 7, p. 83-101, 2020.

MOURA, F. E. A. et al. Seasonality of respiratory syncytial virus in Brazil. Journal of Medical Virology, v. 81, n. 9, p. 1534-1541, 2009.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

PAULES, C.; SUBBARAO, K. Influenza. The Lancet, v. 390, n. 10095, p. 697-708, 2017.

PAYNTER, S. Humidity and respiratory virus transmission. Epidemiology and Infection, v. 143, n. 7, p. 1337-1348, 2015.

PRATHER, K. A. et al. Airborne transmission of SARS-CoV-2. Science, v. 370, n. 6514, p. 303-304, 2020.

RIBAS, F. V. et al. Completude das notificações de síndrome respiratória aguda grave no âmbito nacional e em uma regional de saúde de Minas Gerais, durante a pandemia de COVID-19, 2020. Epidemiologia e Serviços de Saúde, v. 31, n. 2, e2021620, 2022. DOI: 10.1590/S1679-49742022000200004.

SHEK, L. P.; LEE, B. W. Epidemiology and seasonality of respiratory tract virus infections in the tropics. Paediatric Respiratory Reviews, v. 4, n. 2, p. 105-111, 2003.

SILVA, D. R. et al. Respiratory viral infections and effects of meteorological parameters and air pollution in adults with respiratory symptoms admitted to the emergency room. Influenza

and Other Respiratory Viruses, v. 8, n. 1, p. 42-52, 2014. DOI: 10.1111/irv.12158.

TAMERIUS, J. D. et al. Environmental predictors of seasonal influenza epidemics across temperate and tropical climates. PLoS Pathogens, v. 9, n. 3, e1003194, 2013.

VON ELM, E. et al. The Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology, STROBE, statement: guidelines for reporting observational studies. The Lancet, v. 370, n. 9596, p. 1453-1457, 2007. DOI: 10.1016/S0140-6736(07)61602-X.

WANG, C. C. et al. Airborne transmission of respiratory viruses. Science, v. 373, n. 6558, eabd9149, 2021.

YUSUF, S. et al. The relationship of meteorological conditions to the epidemic activity of respiratory syncytial virus. Epidemiology and Infection, v. 135, n. 7, p. 1077-1090, 2007.

¹ Discente do Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas de Desenvolvimento do Semiárido, da Fundação Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Campus Petrolina (PE). E-mail:

[acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente do Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas de Desenvolvimento do Semiárido, da Fundação Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Campus Petrolina (PE). E-mail:

[acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)