

ANÁLISE DO PADRÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA COBERTURA VACINAL CONTRA POLIOMIELITE NO ESTADO DO PIAUÍ ENTRE 2013 E 2024

SPATIAL AND TEMPORAL PATTERN ANALYSIS OF POLIO VACCINATION COVERAGE IN THE STATE OF PIAUÍ BETWEEN 2013 AND 2024

ANÁLISIS DEL PATRÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA COBERTURA DE VACUNACIÓN CONTRA LA POLIOMIELITIS EN EL ESTADO DE PIAUÍ ENTRE 2013 Y 2024

Jâina Carolina Meneses Calçada

Mestre em Saúde Pública, Escola Nacional de Saúde Pública/Fiocruz, Brasil

E-mail: jainacarol@gmail.com

Dario Brito Calçada

Doutor em Ciência da Computação, Universidade Estadual do Piauí, Brasil

E-mail: dariobcalcada@phb.uespi.br

Eduardo Krempser

Doutor em Modelagem Computacional, Instituto de Tecnologia em Imunobiológicos
(Bio-manguinhos)/Fiocruz, Brasil

E-mail: eduardo.krempser@fiocruz.br

Andréa Sobral

Doutora em Saúde Pública, Escola Nacional de Saúde Pública/Fiocruz, Brasil

E-mail: andrea.sobral@fiocruz.br

Resumo

A poliomielite, embora o Brasil tenha a certificação de território livre da doença, enfrenta um risco de reintrodução devido à acentuada queda nas taxas de cobertura vacinal, pois de acordo com o Ministério da Saúde, a meta preconizada para a cobertura vacinal da poliomielite é de no mínimo 95%. Este estudo objetivou analisar o padrão espacial e temporal da cobertura vacinal contra a poliomielite nos 224 municípios do Piauí, Brasil, no período de 2013 a 2024. Trata-se de um estudo ecológico, retrospectivo e quantitativo, que utilizou dados secundários do Sistema de Informações do Programa Nacional de Imunizações (SI-PNI/DATASUS) e dados cartográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Foram empregadas análises de séries temporais e geoespaciais, incluindo mapeamento temático, Índice de Moran I e Local Indicators of Spatial Association (LISA), com o auxílio da linguagem Python. Os resultados revelaram uma significativa volatilidade temporal na cobertura média estadual, com um declínio acentuado em 2021 (78,92%) e uma recuperação em 2024 (119,69%). Contudo, a análise municipal evidenciou uma persistente

heterogeneidade espacial com populações subimunizadas, com municípios apresentando baixas coberturas vacinais o que representa alto risco para a reintrodução do poliovírus. A análise geoespacial confirmou a autocorrelação espacial e a formação de clusters de baixa-baixa cobertura. Conclui-se que o geoprocessamento é uma ferramenta diagnóstica poderosa para identificar áreas prioritárias e auxiliar na avaliação do padrão espaço-temporal da cobertura da pólio. Assim, será possível direcionar intervenções de saúde pública focadas, mitigando o risco de reintrodução da poliomielite no Piauí.

Palavras-chave: Cobertura Vacinal; Poliomielite; Geoprocessamento; Vigilância em Saúde; Piauí.

Abstract

Poliomyelitis, although Brazil holds certification as a disease-free territory, faces a risk of reintroduction due to a sharp decline in vaccination coverage rates. This study aimed to analyze the spatial and temporal patterns of polio vaccination coverage in the 224 municipalities of Piauí, Brazil, from 2013 to 2024. This was an ecological, retrospective, and quantitative study, utilizing secondary data from the National Immunization Program Information System (SI-PNI/DATASUS) and cartographic data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Time series and geospatial analyses were employed, including thematic mapping, Moran's I Index, and Local Indicators of Spatial Association (LISA), using Python programming language. Results revealed significant temporal volatility in the average state coverage, with a sharp decline in 2021 (78.92%) and a recovery in 2024 (119.69%). However, municipal-level analysis showed persistent spatial heterogeneity and the formation of "pockets of susceptibles"—municipalities with chronically low coverage—which pose a high risk for poliovirus reintroduction. Geospatial analysis confirmed spatial autocorrelation and the formation of low-low coverage clusters. It is concluded that geoprocessing is a powerful diagnostic tool for identifying priority areas and guiding focused public health interventions, thereby mitigating the risk of polio reintroduction in Piauí.

Keywords: Vaccination Coverage; Poliomyelitis; Geoprocessing; Health Surveillance; Piauí.

Resumen

La poliomielitis, aunque Brasil tiene la certificación de territorio libre de la enfermedad, enfrenta un riesgo de reintroducción debido a la marcada caída en las tasas de cobertura vacunal, ya que según el Ministerio de Salud, la meta recomendada para la cobertura vacunal contra la poliomielitis es de un mínimo del 95%. Este estudio tuvo como objetivo analizar el patrón espacial y temporal de la cobertura vacunal contra la poliomielitis en los 224 municipios de Piauí, Brasil, en el período de 2013 a 2024. Se trata de un estudio ecológico, retrospectivo y cuantitativo, que utilizó datos secundarios del Sistema de Información del Programa Nacional de Inmunizaciones (SI-PNI/DATASUS) y datos cartográficos del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE). Se

emplearon análisis de series temporales y geoespaciales, incluyendo mapeo temático, Índice de Moran I e Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA), con la ayuda de la lenguaje Python. Los resultados revelaron una volatilidad temporal significativa en la cobertura promedio estatal, con un declive marcado en 2021 (78,92%) y una recuperación en 2024 (119,69%). Sin embargo, el análisis municipal evidenció una heterogeneidad espacial persistente con poblaciones subinmunizadas, con municipios presentando coberturas vacinales bajas, lo que representa un alto riesgo para la reintroducción del poliovirus. El análisis geoespacial confirmó la autocorrelación espacial y la formación de clusters de cobertura baja-baja. Se concluye que el geoprocésamiento es una herramienta diagnóstica poderosa para identificar áreas prioritarias y auxiliar en la evaluación del patrón espacio-temporal de la cobertura de polio. Así, será posible dirigir intervenciones de salud pública enfocadas, mitigando el riesgo de reintroducción de la poliomiélitis en Piauí.

Palabras clave: Cobertura Vacunal; Poliomiélitis; Geoprocésamiento; Vigilancia en Salud; Piauí.

1. INTRODUÇÃO

A vacinação representa uma das intervenções mais bem-sucedidas e custo-efetivas na história da saúde pública, sendo responsável pela prevenção de milhões de mortes anualmente e pela erradicação ou controle de diversas doenças infecciosas em escala global (Brasil, 2022a, 2022b; Nóvoa et al., 2020). No Brasil, o Programa Nacional de Imunizações (PNI), instituído em 1973, é reconhecido internacionalmente como um modelo de sucesso, culminando na certificação da eliminação da poliomiélite em 1994 (Sato, 2020; Sato; Barros, 2018). Essa conquista histórica foi alicerçada em altas e homogêneas coberturas vacinais, essenciais para a manutenção da imunidade de grupo e a proteção da população contra a reintrodução de patógenos.

Contudo, a partir de 2016, o cenário epidemiológico brasileiro tem sido marcado por um declínio alarmante e persistente nas taxas de cobertura vacinal para diversas doenças imunopreveníveis, incluindo a poliomiélite (Costa; Martins, 2025; Pizani; Dearo; Pereira, 2025). Essa tendência de queda foi agravada pela pandemia de COVID-19, que impôs desafios adicionais aos sistemas de saúde e à adesão às campanhas de vacinação (Silva, 2022). Como consequência, o país enfrenta um risco crescente de reintrodução de doenças já controladas, como o sarampo e a própria poliomiélite, cujos casos de ressurgimento em outras regiões

do mundo servem como um alerta global (Homma et al., 2023). Estudos nacionais já evidenciam que nenhum estado brasileiro atingiu a meta de 95% de cobertura vacinal contra a poliomielite em 2021, com as regiões Norte e Nordeste apresentando os piores indicadores (Arroyo et al., 2020; Benedetti et al., 2022; Palmieri et al., 2023).

Diante desse contexto de vulnerabilidade, a análise detalhada das coberturas vacinais torna-se imperativa, especialmente em níveis subnacionais. Embora a literatura nacional tenha explorado a tendência de queda, há uma lacuna de estudos que aplicam uma análise geoespacial detalhada em nível municipal para estados do Nordeste, como o Piauí. Esta região apresenta desafios logísticos e sociais únicos, como grandes extensões territoriais e populações rurais dispersas, que demandam uma compreensão aprofundada das variações locais (Freitas et al., 2022; Rodrigues et al., 2025).

Nesse sentido, a aplicação de geotecnologias e da análise espacial tem se mostrado uma ferramenta poderosa para a vigilância em saúde, permitindo transformar dados brutos em inteligência acionável. Estudos prévios demonstraram a eficácia do geoprocessamento na identificação de clusters de baixa cobertura vacinal para outras imunizações, como a análise espacial da cobertura vacinal contra o poliovírus durante a pandemia de COVID-19 (Toledo; Ruggio; Walty, 2025) e a distribuição espacial da cobertura vacinal contra o Papilomavírus Humano no estado do Maranhão (Fernandes et al., 2025). A visualização geográfica otimiza o planejamento e a execução de campanhas vacinais, reforçando o potencial do geoprocessamento como ferramenta diagnóstica (Hino et al., 2006; Ministério da Saúde, 2024; Serafim; Serafim, 2024).

Este trabalho se insere nessa perspectiva, buscando preencher a lacuna de conhecimento ao analisar a evolução da cobertura vacinal contra a poliomielite nos 224 municípios do Piauí, no período de 2013 a 2024.

2. METODOLOGIA

2.1 DELINEAMENTO DO ESTUDO E UNIDADE DE ANÁLISE

Este estudo adotou um delineamento ecológico, retrospectivo e descritivo, com abordagem quantitativa e de análise espacial. A escolha deste desenho metodológico é justificada pela necessidade de investigar padrões e tendências de saúde em nível populacional, utilizando dados agregados para inferir sobre a dinâmica da cobertura vacinal em um contexto geográfico e temporal específico. A unidade de análise foram os 224 municípios do estado do Piauí, Brasil, permitindo uma avaliação detalhada das variações locais que são cruciais para a vigilância em saúde. O período de estudo compreendeu os anos de 2013 a 2024, abrangendo uma década de dados que permite observar a evolução das políticas de imunização e os impactos de eventos como a queda generalizada das coberturas vacinais no Brasil.

2.2 FONTES E COLETA DE DADOS

Os dados utilizados neste estudo, correspondentes a cobertura vacinal do esquema básico (3 doses) sem as doses de reforço, são de natureza secundária e foram obtidos a partir de fontes oficiais e de acesso público:

- Sistema de Informações do Programa Nacional de Imunizações (SI-PNI): Esta é a principal fonte para os dados de cobertura vacinal. O SI-PNI, gerido pelo Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS), fornece dados detalhados sobre as doses aplicadas de vacinas obrigatórias no calendário de imunização infantil. Para este estudo, foram extraídos anualmente os dados de cobertura vacinal contra a poliomielite por município, permitindo o cálculo do indicador de cobertura vacinal anual.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): Para o cálculo das taxas de cobertura vacinal ($\text{Cobertura vacinal (\%)} = (\text{Número de crianças vacinadas} / \text{População-alvo}) \times 100$) e para as análises geoespaciais, foram utilizados dados populacionais municipais do IBGE. Estes incluem estimativas de população infantil menores de 1 ano, que servem como denominador para o cálculo das taxas de coberturas, e arquivos vetoriais (*shapefiles*) da malha municipal (referente ao ano de 2024).

2.3 PROCESSAMENTO E CATEGORIZAÇÃO DOS DADOS

O processamento inicial dos dados envolveu a compilação e organização das informações de cobertura vacinal e populacionais. O indicador analisado foi a cobertura vacinal anual contra a poliomielite por município. Para facilitar a interpretação e a visualização dos padrões de saúde, a cobertura vacinal foi categorizada em quatro faixas, refletindo diferentes níveis de risco epidemiológico e de adequação às metas de saúde pública:

- 0-40%: Baixa Cobertura (parcela muito pequena da população-alvo vacinada. Indicativo de alto risco e necessidade urgente de intervenção).
- 41-70%: Média Cobertura (menos da metade até cerca de dois terços do público-alvo protegido. Risco elevado, requer atenção e reforço das ações).
- 71-94%: Cobertura Adequada, abaixo da meta (maioria vacinada, mas ainda aquém da meta oficial. Ainda não atinge a imunidade de grupo ideal, mas com menor risco imediato).
- $\geq 95\%$: Meta de Cobertura Atingida (meta do PNI alcançada. Nível considerado seguro para a imunidade de grupo e controle da doença).

Valores de cobertura vacinal acima de 100% foram mantidos na categoria "Cobertura Atingida", considerando que tais ocorrências podem refletir inconsistências no denominador populacional (estimativas populacionais) ou a vacinação de crianças residentes em outros municípios, fenômenos comuns em dados secundários de saúde. Este estudo é de caráter descritivo, não envolvendo análises de significância estatística para inferências causais, mas sim para a identificação de padrões e tendências.

2.4 ANÁLISE DE COBERTURAS POR ANO

Para identificar tendências e padrões temporais na cobertura vacinal, empregou-se a análise de coberturas a cada ano. Este método permitiu a avaliação das variações nas taxas de cobertura vacinal ao longo do período de 2013 a 2024, identificando possíveis declínios, aumentos ou períodos de estagnação. A técnica de decomposição que foi utilizada para distinguir componentes sazonais, cíclicos

(flutuações de longo prazo) e de tendência (movimento geral de crescimento ou decréscimo), oferecendo uma compreensão mais profunda da dinâmica temporal da imunização e dos fatores que podem influenciar a adesão à vacinação ao longo do tempo.

2.5 ANÁLISE GEOESPACIAL

A análise geoespacial foi um componente fundamental deste estudo, permitindo a visualização e interpretação das variações espaciais na taxa de cobertura vacinal entre os municípios do Piauí. Para isso, foram utilizados Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para mapear a distribuição espacial das taxas de imunização, com as seguintes análises:

- Modelagem Espacial: Para avaliar a presença de padrões espaciais significativos e identificar clusters de alta ou baixa cobertura vacinal, utilizou-se a análise de autocorrelação espacial. O Índice de Moran I (ANSELIN, 1995) foi empregado para medir a correlação espacial global entre os valores de cobertura vacinal em diferentes municípios, indicando se há um padrão espacial significativo (dispersão, aleatoriedade ou agrupamento). Adicionalmente, para identificar clusters locais de alta ou baixa cobertura vacinal, foi utilizado o *Local Indicators of Spatial Association* (LISA) (ANSELIN, 1995). O LISA permite a identificação de áreas específicas onde a autocorrelação espacial é significativa, destacando agrupamentos de municípios com coberturas vacinais semelhantes (altas-altas ou baixas-baixas) ou discrepantes (altas-baixas ou baixas-altas).

- Construção de Mapas de Calor: Foram construídos mapas de calor para cada ano do estudo (2013 a 2024) com o objetivo de visualizar a distribuição espacial das taxas de cobertura vacinal. Esses mapas facilitam a identificação de áreas com maiores e menores taxas de cobertura, permitindo uma análise visual mais intuitiva dos dados e a rápida identificação de regiões que demandam atenção em saúde.

2.6 TRATAMENTO E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram inicialmente compilados e organizados em planilhas

eletrônicas. As análises estatísticas descritivas foram realizadas para caracterizar a distribuição das coberturas vacinais ao longo do tempo e entre os municípios. O software R® foi utilizado para a execução das análises das séries ao longo dos anos e geoespaciais, empregando pacotes específicos como "*forecast*" para a decomposição de séries temporais e "*spdep*" para as análises de autocorrelação espacial. A significância estatística para os testes de autocorrelação espacial foi avaliada ao nível de significância de 5%.

2.7 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Toda a manipulação dos dados, cálculos dos modelos e construção das figuras dos resultados foram realizados utilizando a linguagem de programação *Python*. As bibliotecas específicas utilizadas incluíram: *geopandas* para a manipulação e análise de dados geoespaciais; *pandas* para a gestão e análise de dados tabulares; *numpy* para realização dos cálculos numéricos; e *matplotlib* para a visualização de dados e a construção de gráficos e mapas.

2.8 ASPECTOS ÉTICOS

Este estudo utilizou exclusivamente dados secundários, agregados e de acesso público, provenientes de sistemas de informação governamentais (SI-PNI/DATASUS e IBGE). Não houve envolvimento direto com seres humanos nem a coleta de informações pessoais identificáveis. Dessa forma, o estudo está em conformidade com as normas éticas de pesquisa, dispensando a submissão a um Comitê de Ética em Pesquisa, conforme a Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde.

3. RESULTADOS

A análise da cobertura vacinal contra poliomielite nos 224 municípios do Piauí, no período de 2013 a 2024, abrangendo crianças menores de um ano de idade conforme recomendação do esquema básico de vacinação, revelou um cenário complexo de volatilidade temporal e heterogeneidade espacial significativa. Durante o período analisado, foram aplicadas 1.847.392 doses de vacina contra

poliomielite, em uma população média de 187.543 crianças menores de um ano, resultando em uma taxa média de cobertura vacinal de 94,2% no estado.

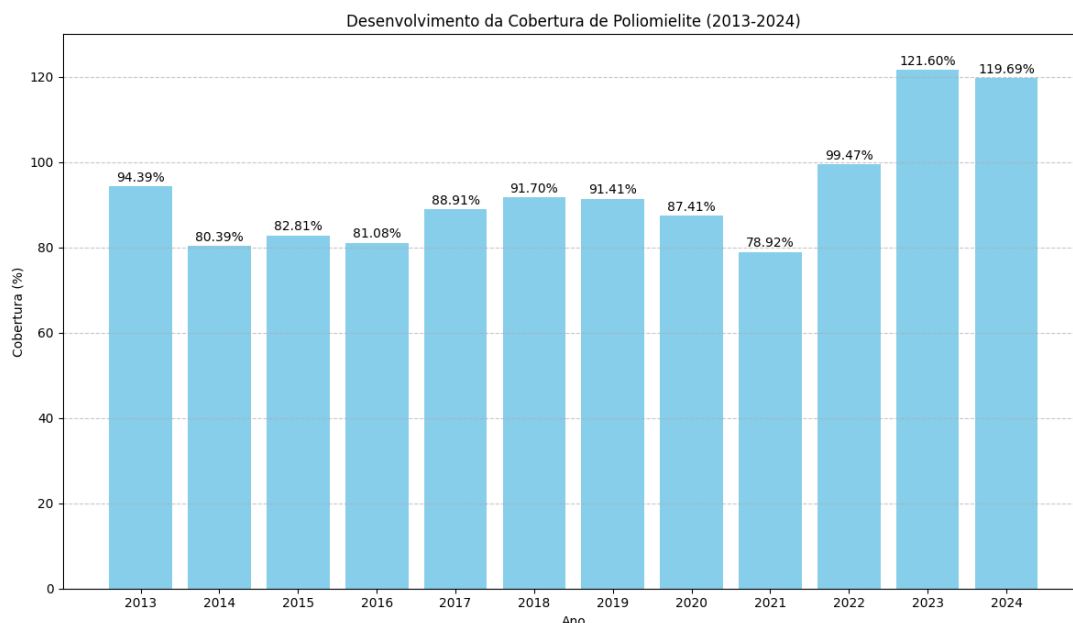
3.1 TENDÊNCIA TEMPORAL DA COBERTURA VACINAL ESTADUAL

A taxa média de cobertura vacinal estadual no Piauí apresentou flutuações consideráveis ao longo da década analisada, com variações que oscilaram entre 78,92% e 119,69%. Em 2013, a cobertura média estadual era de 94,39%, próxima à meta de 95% preconizada pelo Ministério da Saúde (Brasil, 2022b) e recomendada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para a manutenção da imunidade de grupo. Contudo, observou-se uma tendência de declínio nos anos subsequentes, culminando em um declínio acentuado em 2021, quando a cobertura atingiu 78,92%, o menor valor registrado no período. Este período de baixa cobertura coincide com o auge da pandemia de COVID-19, que impactou negativamente os programas de imunização em todo o país, além da escalada da política antivacina (Colla; Eberhardt, 2023; Toledo; Ruggio; Walty, 2025).

A partir de 2022, iniciou-se um processo de recuperação, com a cobertura média estadual calculada em 119,69% em 2024, superando a meta estabelecida. Contudo, esse aumento de cobertura registrado e a ocorrência de valores acima de 100% requerem interpretação cautelosa, podendo indicar inconsistências no denominador populacional, vacinação de crianças residentes em outros municípios ou, ainda, a influência da mudança no esquema básico de vacinação implementada em 2024, que reduziu as doses de reforço de duas para uma dose aos 15 meses (Figura 1).

A decomposição da série temporal revelou componentes de tendência, sazonalidade e variação cíclica na cobertura vacinal. O componente de tendência evidencia o declínio progressivo observado até 2021, seguido de recuperação robusta a partir de 2022.

Figura 1. Cobertura da Vacina contra a Poliomielite no Piauí (2013 – 2024)



Fonte: Autores (2026)

3.2 HETEROGENEIDADE MUNICIPAL E BOLSÕES DE SUSCETÍVEIS

Apesar da recuperação da média estadual, a análise em nível municipal evidenciou uma heterogeneidade persistente na taxa de cobertura vacinal, com a formação de áreas geograficamente delimitadas de baixa cobertura – municípios que consistentemente apresentaram coberturas inferiores à meta de 95%. Em anos de média estadual relativamente alta, diversos municípios mantiveram coberturas criticamente baixas. Por exemplo, em 2016, quando a média estadual já demonstrava sinais de declínio, municípios como Floriano (23,61%) e Buriti dos Lopes (21,34%) registraram coberturas muito abaixo da meta e das médias estaduais daquele período, indicando barreiras locais à vacinação.

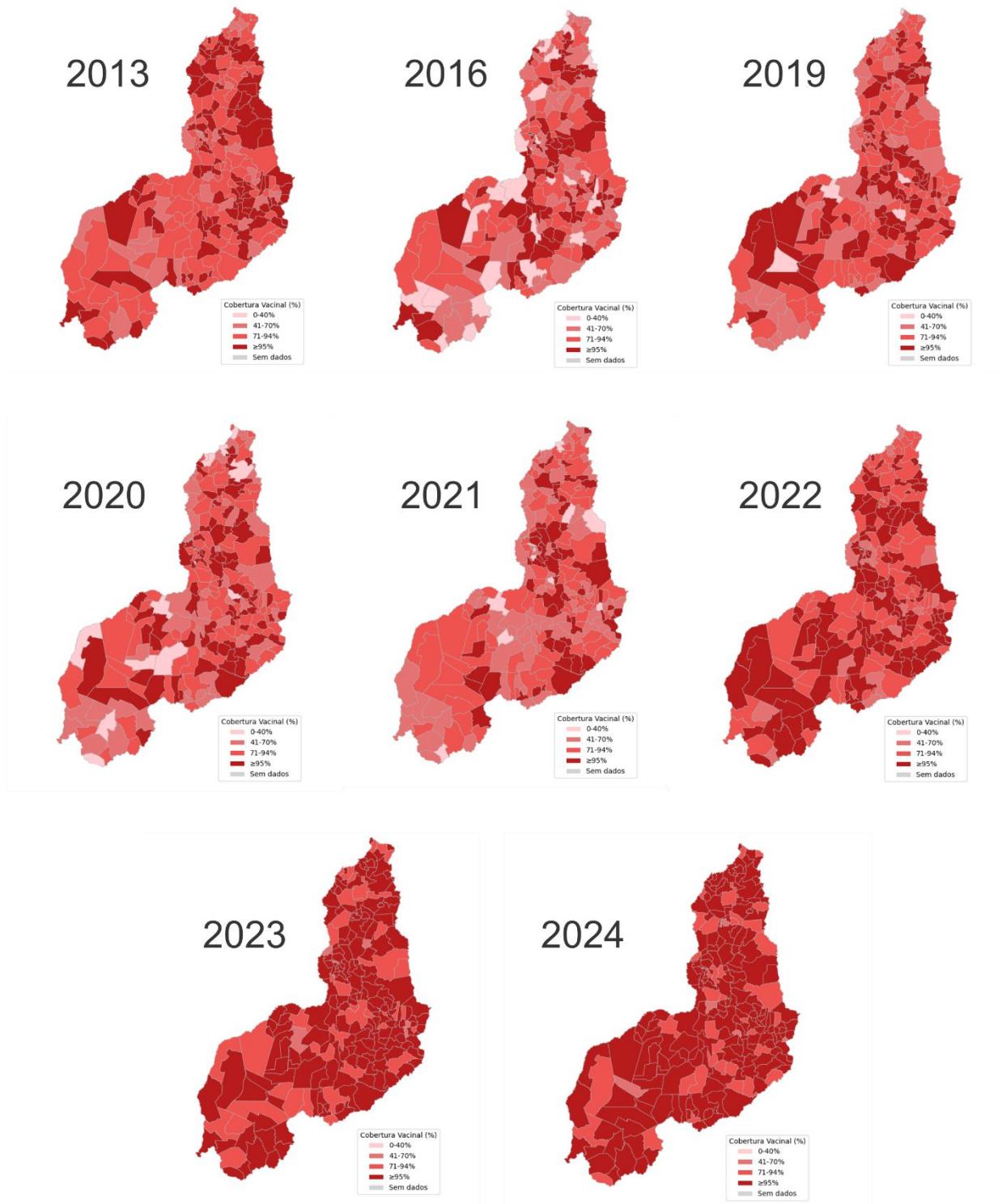
A situação de baixa cobertura persistiu em alguns municípios mesmo durante os anos de recuperação estadual. Em 2024, apesar da elevada média estadual de 119,69%, 10 municípios (4,5% do total) ainda apresentavam cobertura entre 71% e 94%, e 6 municípios (2,7% do total) registravam coberturas na faixa de 0% a 70%. Entre estes últimos, destacam-se Arraial (52,64%), Wall Ferraz (53,47%) e Palmeira do Piauí (57,64%), evidenciando a necessidade urgente de intervenções localizadas e direcionadas nessas áreas.

Essa discrepância entre a média estadual e as coberturas municipais revela que a agregação dos dados em nível estadual mascara a realidade heterogênea da cobertura vacinal. Municípios com elevadas coberturas compensam estatisticamente aqueles com coberturas criticamente baixas, criando uma falsa impressão de adequação da imunização em nível estadual. Tal padrão é particularmente preocupante considerando que a imunidade de grupo requer cobertura uniforme e abrangente em todas as áreas geográficas, não apenas em média.

3.3 PADRÕES ESPACIAIS DA COBERTURA VACINAL

A análise geoespacial revelou padrões de distribuição da taxa de cobertura vacinal que não seriam evidentes apenas pela análise temporal ou por médias estaduais. Os mapas temáticos demonstraram visualmente a concentração de municípios com baixa cobertura em determinadas regiões do estado, sugerindo a hipótese da existência de fatores geográficos, logísticos ou socioeconômicos comuns que influenciam a adesão à vacinação (Figura 2).

Figura 2. Mapa de Calor de Cobertura Vacinal contra a Poliomielite no Piauí (2013, 2016, 2019-2024)



Fonte. Autores (2026)

A aplicação do Índice de Moran I confirmou a existência de autocorrelação espacial significativa ($p < 0,05$) na distribuição da taxa de cobertura vacinal, indicando que municípios com coberturas semelhantes tendem a se agrupar geograficamente, não ocorrendo de forma aleatória. A análise LISA (*Local Indicators of Spatial Association*) permitiu identificar clusters específicos de associação espacial:

- Clusters de Baixa-Baixa (*Low-Low*): Regiões onde municípios com baixa cobertura vacinal estão circundados por outros municípios também com baixa cobertura, formando áreas de alto risco para a reintrodução e circulação do poliovírus. Esses clusters representam prioridades críticas para intervenção, uma vez que a ausência de imunidade de grupo em áreas contíguas amplifica o risco epidemiológico.

- Clusters de Alta-Alta (*High-High*): Regiões onde municípios com alta cobertura estão cercados por outros com alta cobertura, indicando áreas de sucesso consolidado na imunização e menor risco de transmissão viral.

- Clusters de Alta-Baixa (*High-Low*) e Baixa-Alta (*Low-High*): Municípios com coberturas discrepantes em relação aos seus vizinhos, que podem indicar barreiras locais específicas, intervenções pontuais bem-sucedidas ou, ainda, fluxos migratórios e movimentação populacional que influenciam a dinâmica de vacinação em áreas limítrofes.

Os resultados da análise espacial demonstram que a identificação de clusters de baixa cobertura é fundamental para a alocação eficiente de recursos e o planejamento de intervenções focadas em áreas de maior vulnerabilidade. A correlação espacial observada pode indicar que os fatores que influenciam a baixa cobertura não são isolados a um único município, mas podem ter causas regionais, como barreiras logísticas, dificuldades de acesso a serviços de saúde, disparidades socioeconômicas ou padrões de hesitação vacinal que se propagam entre comunidades vizinhas.

4. DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo revelam uma realidade complexa e preocupante da cobertura vacinal contra poliomielite no Piauí entre 2013 e 2024, caracterizada pela volatilidade temporal em nível estadual e pela persistência de heterogeneidade espacial significativa em nível municipal. A taxa média de cobertura vacinal estadual oscilou entre 78,92% (2021) e 119,69% (2024), enquanto a análise municipal identificou clusters de baixa-baixa cobertura que representam áreas críticas de vulnerabilidade epidemiológica. Esses achados apontam para a necessidade de análises desagregadas que transcendam as médias estaduais, revelando a realidade heterogênea da imunização no território.

4.1 CONTEXTO NACIONAL E TEMPORAL DA COBERTURA VACINAL

O declínio da taxa de cobertura vacinal observado no Piauí, particularmente em 2021, alinha-se com tendências nacionais documentadas na literatura. Estudos anteriores demonstraram um declínio progressivo das imunizações infantis no Brasil a partir de 2013, com intensificação durante o período pandêmico (Freitas et al., 2022; Rodrigues et al., 2025). No Piauí especificamente, pesquisas prévias destacaram a incapacidade persistente dos municípios em atingir a meta de 95% de cobertura em anos recentes (Silva et al., 2025).

A pandemia de COVID-19 funcionou como fator exacerbador desse processo, desorganizando os serviços de saúde, desviando recursos humanos e financeiros das atividades rotineiras de imunização, e amplificando fenômenos de hesitação vacinal em segmentos populacionais (Colla; Eberhardt, 2023; Toledo; Ruggio; Walty, 2025). Concomitantemente, observou-se uma escalada de movimentos antivacina que contribuíram para a redução da adesão aos programas de imunização em diversos contextos (Homma et al., 2023).

O percentual médio estadual de 119,69% registrado em 2024 pode indicar uma reação expressiva das campanhas de imunização no período pós-pandêmico. Não obstante, tanto essa recuperação pronunciada quanto a incidência de coberturas superiores a 100% demandam interpretação cautelosa. Conforme abordado na seção de Resultados, tais cifras podem decorrer de inconsistências nas estimativas populacionais utilizadas como denominador, do deslocamento de

crianças entre municípios para fins de vacinação ou, ainda, do efeito da alteração do esquema vacinal básico introduzida em 2024, que suprimiu uma das doses de reforço, passando de duas para uma única aplicação aos 15 meses de idade. Essa modificação do calendário vacinal pode acarretar impactos substanciais sobre a cobertura futura, requerendo monitoramento sistemático para verificar se contribuirá para a sustentação ou para o incremento dos níveis de imunização.

4.2 HETEROGENEIDADE ESPACIAL E ÁREAS DE BAIXA COBERTURA VACINAL

A principal contribuição deste estudo reside na identificação e caracterização da heterogeneidade espacial da cobertura vacinal em nível municipal. A análise revelou que mesmo em anos de recuperação da média estadual, a presença de municípios com coberturas criticamente baixas persiste como padrão estrutural. Em 2016, municípios como Floriano (23,61%) e Buriti dos Lopes (21,34%) apresentavam coberturas drasticamente inferiores à meta nacional de 95%, enquanto em 2024, apesar da elevada média estadual, seis municípios (2,7% do total) ainda registravam coberturas na faixa de 0% a 70%, destacando-se Arraial (52,64%), Wall Ferraz (53,47%) e Palmeira do Piauí (57,64%).

Essa discrepância entre a média estadual e as coberturas municipais revela um fenômeno crítico: a agregação dos dados em nível estadual mascara a realidade heterogênea da imunização. Municípios com elevadas coberturas compensam estatisticamente aqueles com coberturas cronicamente baixas, criando uma falsa impressão de adequação da imunização em nível estadual. Tal padrão é particularmente preocupante considerando que a imunidade de grupo requer cobertura uniforme e abrangente em todas as áreas geográficas, não apenas em média. A persistência de áreas com baixa cobertura representa um risco epidemiológico significativo para a reintrodução do poliovírus, uma vez que essas regiões funcionam como reservatórios potenciais de suscetibilidade.

Esses achados corroboram estudos que apontam para desafios únicos na região Nordeste do Brasil, caracterizados por grandes extensões territoriais, populações rurais dispersas, infraestrutura de saúde fragmentada e dificuldades de

acesso aos serviços de imunização (Fernandes et al., 2025; Ruela; Girardi; Araújo, 2025). Além dos fatores logísticos, pesquisas qualitativas em contextos similares identificaram barreiras socioculturais, crenças sobre vacinação, dificuldades de acesso informacional e desconfiança em relação aos serviços de saúde como determinantes da baixa adesão (Castilho et al., 2025).

4.3 PADRÕES ESPACIAIS E IMPLICAÇÕES PARA VIGILÂNCIA EM SAÚDE

A análise geoespacial utilizando o Índice de Moran I confirmou a existência de autocorrelação espacial significativa ($p < 0,05$) na distribuição da cobertura vacinal, indicando que municípios com coberturas semelhantes tendem a se agrupar geograficamente de forma não-aleatória. A aplicação da análise LISA identificou clusters específicos de associação espacial que revelam padrões estruturados de vulnerabilidade e sucesso na imunização.

Os clusters de baixa-baixa cobertura (*Low-Low*) representam áreas de alto risco epidemiológico onde municípios com baixa cobertura estão circundados por outros municípios também com baixa cobertura, amplificando o risco de circulação viral em nível regional. Inversamente, os clusters de alta-alta cobertura (*High-High*) indicam regiões onde a imunidade de grupo foi consolidada de forma robusta. Os *clusters* mistos (alta-baixa e baixa-alta) sugerem a presença de barreiras locais específicas, intervenções pontuais bem-sucedidas ou fluxos migratórios que influenciam a dinâmica de vacinação em áreas limítrofes.

A detecção desses agrupamentos espaciais acarreta consequências diretas para a distribuição de recursos e a formulação de estratégias interventivas. A autocorrelação espacial verificada sugere que os determinantes da reduzida cobertura vacinal não se restringem a municípios isolados, mas decorrem potencialmente de fatores regionais compartilhados, tais como obstáculos logísticos de natureza estrutural, limitações sistêmicas no acesso aos serviços de saúde, desigualdades socioeconômicas e dinâmicas de hesitação vacinal que se difundem entre localidades contíguas por meio de redes sociais e culturais. (Ministério da Saúde, 2024; Silva, 2022).

Conforme recomendado pelo Ministério da Saúde brasileiro, o geoprocessamento constitui ferramenta diagnóstica poderosa para a vigilância em saúde, permitindo que gestores aloquem recursos de forma mais eficiente e planejem intervenções focadas em áreas de maior vulnerabilidade (Ministério da Saúde, 2024). A análise em nível municipal é, portanto, indispensável para uma vigilância eficaz e para a mitigação do risco de reintrodução do poliovírus no país.

4.4 DECOMPOSIÇÃO TEMPORAL E COMPONENTES DA SÉRIE

A decomposição da série temporal revelou componentes distintos de tendência, sazonalidade e variação cíclica na cobertura vacinal estadual. O componente de tendência evidencia o declínio progressivo observado até 2021, seguido de recuperação acentuada a partir de 2022, refletindo o impacto da pandemia e a subsequente resposta das campanhas de imunização.

Esses padrões temporais são consistentes com a literatura que documenta a influência de fatores sazonais e cíclicos nos programas de imunização, particularmente em contextos de recursos limitados (Pereira et al., 2023). A compreensão desses componentes é fundamental para o planejamento de campanhas e a antecipação de períodos de risco.

4.5 IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICA E PRÁTICA EM SAÚDE PÚBLICA

As implicações para a saúde pública são significativas e multifacetadas. A persistência de áreas com baixa cobertura, mesmo diante de esforços de recuperação estadual, exige uma reavaliação fundamental das estratégias de imunização. Recomenda-se:

1. Intervenções focadas e contextualizadas: Campanhas de vacinação e estratégias de busca ativa devem ser intensificadas e adaptadas às realidades locais dos municípios com baixa cobertura crônica. A identificação de *clusters* de baixa-baixa cobertura permite a alocação prioritária de recursos para essas áreas. Estudos de campo são necessários para identificar os fatores específicos (logísticos, sociais, culturais, hesitação vacinal, acesso informacional) que

contribuem para a baixa adesão em cada região, permitindo o desenvolvimento de estratégias personalizadas e culturalmente sensíveis.

2. Monitoramento contínuo e vigilância geoespacial: O uso de dashboards geoespaciais pelas secretarias de saúde estaduais e municipais pode facilitar a identificação rápida de áreas de risco, permitindo a tomada de decisão em tempo real. A integração de dados de cobertura vacinal com indicadores socioeconômicos e demográficos pode enriquecer a análise e orientar intervenções mais precisas.

3. Investigação de determinantes da baixa cobertura: Pesquisas qualitativas são necessárias para compreender as percepções, barreiras e facilitadores à vacinação nas comunidades identificadas como áreas de baixa cobertura. Tais estudos devem explorar dimensões culturais, econômicas, de acesso e de confiança nos serviços de saúde.

4. Monitoramento do impacto da mudança no esquema vacinal: A redução das doses de reforço implementada em 2024 requer acompanhamento rigoroso para avaliar seu impacto nas taxas de cobertura e na proteção imunológica das crianças. Estudos de efetividade são necessários para validar essa mudança em contextos de baixa cobertura.

4.6 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Este estudo, embora robusto em sua abordagem geoespacial e temporal, possui limitações inerentes ao uso de dados secundários que requerem explicitação. A qualidade e a consistência dos dados do SI-PNI podem variar entre municípios e períodos, refletindo diferenças em capacidade de registro e gerenciamento de informações. A ocorrência de coberturas acima de 100% em alguns anos sugere possíveis inconsistências no denominador populacional, embora tal fenômeno possa também refletir movimento de crianças entre municípios para vacinação ou mudanças no calendário vacinal.

Por ser um estudo ecológico, as inferências sobre causas em nível individual devem ser feitas com cautela, reconhecendo o risco de falácia ecológica. As análises apresentadas descrevem padrões agregados e não permitem conclusões diretas sobre determinantes individuais da vacinação.

Adicionalmente, o estudo não incorporou variáveis socioeconômicas, demográficas ou culturais que poderiam explicar a heterogeneidade observada. Futuras pesquisas deveriam explorar a correlação entre a cobertura vacinal e indicadores de renda, escolaridade, acesso a serviços de saúde, composição étnica e características geográficas em nível municipal. Pesquisas qualitativas complementares são necessárias para investigar as percepções, crenças e barreiras à vacinação nas comunidades identificadas como áreas de baixa cobertura.

5. CONCLUSÕES

Este estudo analisou o padrão espacial e temporal da cobertura vacinal contra poliomielite nos 224 municípios do Piauí entre 2013 e 2024, com o objetivo de caracterizar a dinâmica de imunização em nível municipal e identificar áreas de vulnerabilidade epidemiológica. Os resultados confirmam que as metas de cobertura vacinal estabelecidas pelo Ministério da Saúde (95%) não são atingidas de forma uniforme e sustentada no território piauiense, revelando uma realidade complexa de volatilidade temporal e heterogeneidade espacial significativa.

A análise temporal evidenciou flutuações acentuadas na taxa média de cobertura estadual, oscilando entre 78,92% em 2021 (mínimo observado) e 119,69% em 2024, com componentes de tendência, sazonalidade e variação cíclica identificados pela decomposição da série temporal. Contudo, a análise municipal revelou o achado mais crítico: a persistência de áreas de baixa cobertura vacinal mesmo em períodos de recuperação estadual. Em 2024, apesar da elevada média estadual, seis municípios (2,7% do total) ainda apresentavam coberturas inferiores a 70%, destacando-se Arraial (52,64%), Wall Ferraz (53,47%) e Palmeira do Piauí (57,64%), enquanto dez municípios (4,5%) mantinham coberturas entre 71% e 94%.

A análise geoespacial utilizando o Índice de Moran I ($p < 0,05$) confirmou a existência de autocorrelação espacial significativa na distribuição da cobertura vacinal, indicando que municípios com coberturas semelhantes tendem a se agrupar geograficamente. A aplicação da análise LISA identificou clusters

específicos de associação espacial: clusters de baixa-baixa cobertura (*Low-Low*) representam áreas de alto risco epidemiológico onde a ausência de imunidade de grupo é estrutural; clusters de alta-alta cobertura (*High-High*) indicam regiões de sucesso consolidado; e clusters mistos (alta-baixa e baixa-alta) sugerem barreiras locais específicas ou intervenções pontuais.

A principal contribuição deste estudo reside na demonstração de que a análise em nível municipal é indispensável para a vigilância epidemiológica eficaz. A agregação de dados em nível estadual mascara a realidade heterogênea da imunização, criando uma falsa impressão de adequação quando, na verdade, existem áreas estruturalmente vulneráveis. Essa heterogeneidade não é aleatória, mas segue padrões espaciais que podem refletir fatores geográficos, logísticos e socioeconômicos comuns a regiões contíguas.

O geoprocessamento e as técnicas de análise espacial demonstraram ser ferramentas diagnósticas poderosas para a identificação e mapeamento de clusters de baixa cobertura, fornecendo inteligência acionável para gestores de saúde. Essa abordagem permite a alocação estratégica de recursos e o desenvolvimento de campanhas de vacinação contextualizadas às realidades locais, transcendendo as estratégias genéricas baseadas em médias estaduais.

Para a manutenção da eliminação da poliomielite no Piauí e no Brasil, recomenda-se: (1) implementação de monitoramento geoespacial contínuo integrado aos sistemas de vigilância em saúde; (2) direcionamento prioritário de recursos para clusters de baixa-baixa cobertura identificados neste estudo; (3) desenvolvimento de pesquisas qualitativas para investigar os determinantes específicos da baixa cobertura em cada área de risco; e (4) acompanhamento rigoroso do impacto da mudança no esquema vacinal implementada em 2024 sobre as taxas de cobertura e proteção imunológica.

Futuras pesquisas deverão explorar a correlação entre cobertura vacinal e variáveis socioeconômicas, demográficas e culturais em nível municipal; investigar qualitativamente as percepções, barreiras e facilitadores à vacinação nas comunidades identificadas como áreas de baixa cobertura; e analisar a cobertura

vacinal por dose específica do esquema básico, permitindo identificar em qual etapa ocorrem as maiores perdas de adesão.

REFERÊNCIAS

- ARROYO, L. H. *et al.* Areas with declining vaccination coverage for BCG, poliomyelitis, and MMR in Brazil (2006-2016): maps of regional heterogeneity. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 36, n. 4, p. e00015619, 2020.
- BENEDETTI, Maria Soledade Garcia *et al.* IMPACTO DA PANDEMIA DA COVID-19 NA COBERTURA VACINAL NO ESTADO DE RORAIMA, AMAZÔNIA OCIDENTAL, BRASIL. **The Brazilian Journal of Infectious Diseases**, v. 26, p. 101874, 1 jan. 2022.
- BRASIL. **Desafios e perspectivas para a imunização no Brasil**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2022a.
- BRASIL. **Programa Nacional de Imunizações: Relatório Anual 2022**. Brasil: Ministério da Saúde, 2022b.
- CASTILHO, Bruna Morasco De *et al.* Análise da cobertura vacinal infantil entre os anos 2014 a 2024 e seu impacto na saúde pública. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 18, n. 12, p. e22579, 1 dez. 2025.
- COLLA, F. C.; EBERHARDT, L. D. O Impacto da Pandemia de Covid-19 nas Coberturas Vacinais dos Estados Brasileiros: Impacto da COVID-19 na Vacinação Brasil. **Revista Brasileira em Promoção da Saúde**, v. 36, 2023.
- COSTA, Larissa Pereira; MARTINS, Lívia Mattos. IMPACTOS DA QUEDA DA COBERTURA VACINAL NA REINTRODUÇÃO DE DOENÇAS IMUNOPREVENÍVEIS: UMA REVISÃO DA LITERATURA. **Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences**, v. 7, n. 2, p. 12–27, 1 fev. 2025.
- FERNANDES, Renata Pinheiro Pedra *et al.* Distribuição espacial da cobertura vacinal contra o Papilomavírus Humano no estado do Maranhão. **Cien Saude Colet**, 2025.
- FREITAS, Antoniello Araújo de *et al.* Tendência da Cobertura Vacinal em crianças de zero a 12 meses – Piauí, Brasil, 2013-2020. **Saúde em Debate**, v. 46, n. spe5, p. 57–66, 2022.
- HINO, Paula *et al.* Geoprocessing in health area. **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, v. 14, n. 6, p. 939–943, dez. 2006.
- HOMMA, Akira *et al.* Pela reconquista das altas coberturas vacinais. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 39, n. 3, p. e00240022, 2023.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Geoprocessamento em Saúde, Cadastramento e Territorialização**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2024.

NÓVOA, Thais d'Avila *et al.* Cobertura vacinal do programa nacional de imunizações (PNI). **Brazilian Journal of Health Review**, v. 3, n. 4, p. 7863–7873, 2020.

PALMIERI, Isadora Gabriella Silva *et al.* Cobertura vacinal da tríplice viral e poliomielite no Brasil, 2011-2021: tendência temporal e dependência espacial. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 26, p. e230047, 2023.

PEREIRA, Matheus Adriano Divino *et al.* Cobertura vacinal em menores de um ano e fatores socioeconômicos associados: mapas da heterogeneidade espacial. **Revista Brasileira de Enfermagem**, v. 76, n. 4, p. e20220734, 2023.

PIZANI, Denise Salotti Augusto; DEARO, Márcio Antônio Francisco; PEREIRA, Aline Ferreira De Oliveira. Queda da cobertura vacinal no Brasil: causas, consequências e estratégias de enfrentamento. **Arquivos de Asmas Alergia e Imunologia**, v. 9, n. 2, 2025.

RODRIGUES, Maria Clara Sales *et al.* Impacto da imunização infantil no estado do Piauí: estudo ecológico de séries temporais sobre a cobertura vacinal de 2000 a 2022. **Rev Pre Infec e Saúde [Internet]**, p. 6474, 2025.

RUELA, Guilherme de Andrade; GIRARDI, Sábado Nicolau; ARAÚJO, Jackson Freire. Estrutura da Atenção Primária à Saúde e as coberturas vacinais nos municípios brasileiros. 2025.

SATO, A. P. S. Pandemia e coberturas vacinais: desafios para o retorno às escolas. **Revista de Saúde Pública**, v. 54, n. 115, p. 1–8, 2020.

SATO, A. P. S.; BARROS, M. B. de A. Cobertura vacinal em crianças e adolescentes no Brasil: reflexões sobre os desafios atuais. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 34, n. 9, p. e00015818, 2018.

SERAFIM, Silvio De Oliveira; SERAFIM, Elaine Rafaella Cordeiro Nunes. GEOPROCESSAMENTO NA ÁREA DE SAÚDE. *In: Sensoriamento remoto e estudos urbanos: perspectivas de pesquisa*. 1. ed. [S.l.]: Editora Científica Digital, 2024. p. 37–47.

SILVA, A. A. M. da. Hesitação vacinal e queda da cobertura vacinal infantil durante a pandemia de COVID-19. **Revista de Saúde Pública**, v. 56, p. 80, 2022.

SILVA, Nataly Araújo *et al.* Avaliação epidemiológica da imunização de crianças menores de 15 meses no Estado do Piauí. **Revista Eletrônica Acervo Saúde**, v. 25, p. e17345, 28 jan. 2025.

TOLEDO, Amanda Tavares Ziviani; RUGGIO, Amanda Rezende; WALTY, Cynthia Márcia Romano Faria. Análise Espacial da Cobertura Vacinal Contra o Poliovírus Durante a Pandemia de COVID-19. **Saúde Coletiva (Barueri)**, v. 16, n. 103, p. 18566–18575, 23 dez. 2025.