

Brucelose bovina e saúde do trabalhador em Minas Gerais: modelagem SIR e estimativa de risco ocupacional

Grace Silva Barbosa¹, Luciana Balieiro Cosme¹, Evandro José de Oliveira Júnior¹, Marcos Aurélio Leite Neto²



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n5p701-723>

Artigo recebido em 16 de Maio e publicado em 16 de Julho de 2026

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

A brucelose bovina é uma zoonose endêmica no Brasil com impacto direto sobre a saúde de trabalhadores rurais e agroindustriais. Este trabalho busca modelar a dinâmica de transmissão da brucelose bovina em Minas Gerais e estimar o risco ocupacional humano associado. Foram utilizados dados secundários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, do Instituto Mineiro de Agropecuária e do Sistema de Informação de Agravos de Notificação referentes a 2023. A transmissão no rebanho foi simulada por meio de um modelo compartimental SIR (Susceptíveis–Infectados–Removidos), calibrado com parâmetros da literatura nacional recente ($\beta = 1,5 \times 10^{-7} \text{ dia}^{-1}$; $\gamma = 0,04 \text{ dia}^{-1}$). Aplicou-se uma equação proporcional para estimar a probabilidade de infecção humana sob diferentes níveis de exposição ocupacional.. Com cobertura vacinal de 77,5 % e um contingente de aproximadamente 5,06 milhões de bovinos suscetíveis, o modelo indicou número reprodutivo basal elevado ($R_0 \approx 19$) e prevalência máxima de infectados de 17,8 % no pico da curva epidêmica (dia 26), revelando que a cobertura vacinal vigente está distante do limiar teórico necessário para impedir a circulação do agente no rebanho ($\approx 98,8 \%$). A probabilidade de infecção humana estimada pelo modelo proporcional foi da ordem de 10^{-9} nos cenários de exposição ocupacional avaliados, valor que contrasta fortemente com achados empíricos da literatura — que descrevem odds ratios de até 3,47 entre trabalhadores expostos e prevalências sorológicas de até 6,9 % em populações ocupacionais de alto risco —, evidenciando que o modelo proporcional simplificado tende a subestimar substancialmente o risco real. A modelagem SIR constitui ferramenta útil para subsidiar decisões em saúde pública, mas sua aplicação à estimativa de risco humano deve ser interpretada com cautela e sempre triangulada com vigilância sorológica ativa, sobretudo à luz do Protocolo Clínico e Diretrizes Terapêuticas da Brucelose Humana que reforça a abordagem One Health na articulação entre saúde animal, saúde do trabalhador e vigilância epidemiológica em Minas Gerais.

Palavras-chave: saúde do trabalhador; brucelose bovina; modelagem epidemiológica; zoonoses; saúde ocupacional; Minas Gerais.

Bovine brucellosis and worker health in Minas Gerais: SIR modeling and occupational risk estimation

ABSTRACT

Bovine brucellosis is an endemic zoonosis in Brazil with a direct impact on the health of rural and agro-industrial workers. This study aims to model the transmission dynamics of bovine brucellosis in Minas Gerais and estimate the associated human occupational risk. Secondary data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics, the Minas Gerais Institute of Agriculture and Livestock, and the Notifiable Diseases Information System, referring to 2023, were used. Transmission within the herd was simulated using a compartmental SIR (Susceptible–Infected–Removed) model, calibrated with parameters from recent national literature ($\beta = 1.5 \times 10^{-7} \text{ day}^{-1}$; $\gamma = 0.04 \text{ day}^{-1}$). A proportional equation was applied to estimate the probability of human infection under different levels of occupational exposure. With a vaccination coverage of 77.5% and an estimated population of approximately 5.06 million susceptible cattle, the model indicated a high basic reproduction number ($R_0 \approx 19$) and a maximum prevalence of infected animals of 17.8% at the peak of the epidemic curve (day 26), revealing that current vaccination coverage is far below the theoretical threshold required to prevent the circulation of the agent within the herd ($\approx 98.8\%$). The probability of human infection estimated by the proportional model was on the order of 10^{-9} in the occupational exposure scenarios evaluated, a value that contrasts sharply with empirical findings from the literature — which describe odds ratios of up to 3.47 among exposed workers and seroprevalence rates of up to 6.9% in high-risk occupational populations — indicating that the simplified proportional model tends to substantially underestimate the actual risk. SIR modeling is a useful tool for supporting public health decision-making, but its application to human risk estimation must be interpreted with caution and always triangulated with active serological surveillance, especially in light of the Clinical Protocol and Therapeutic Guidelines for Human Brucellosis, which reinforces the One Health approach in linking animal health, worker health, and epidemiological surveillance in Minas Gerais.

Keywords: worker health; bovine brucellosis; epidemiological modeling; zoonoses; occupational health; Minas Gerais.

Instituição afiliada – 1 Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas, PPGMCS, Universidade Estadual de Montes Claros, UNIMONTES - Montes Claros, MG, Brasil
2 Medicina - Centro Universitário FUNORTE - Montes Claros, MG, Brasil

Autor correspondente: *Grace Silva Barbosa*

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



1 INTRODUÇÃO

A brucelose bovina e humana constitui uma zoonose de elevada relevância para a saúde pública e para o setor agropecuário brasileiro, especialmente em estados com alta densidade de rebanhos, como Minas Gerais. Causada principalmente pela bactéria *Brucella abortus*, a doença provoca aborto, infertilidade e redução da produtividade animal, gerando impactos econômicos expressivos e comprometendo a segurança alimentar (NASCIMENTO et al., 2023). Menos discutida na literatura nacional, contudo, é a face ocupacional dessa zoonose: a brucelose é, antes de tudo, uma doença do trabalho para milhares de pessoas que vivem da pecuária no Brasil.

Em humanos, a infecção ocorre por contato direto com animais doentes, tecidos contaminados (placenta, fetos abortados, secreções vaginais), fluidos biológicos, ou pela ingestão de produtos lácteos não pasteurizados, configurando um agravo essencialmente ocupacional em trabalhadores do campo, vaqueiros, ordenhadores, veterinários e funcionários de frigoríficos (SANTOS et al., 2021). Diferentemente de muitas doenças infecciosas de transmissão comunitária, a brucelose humana se concentra de forma desproporcional em grupos profissionais específicos, o que a caracteriza como problema de saúde do trabalhador antes de ser, estritamente, um problema de saúde pública geral. A brucelose humana é considerada doença reemergente e negligenciada, com risco acentuado em atividades laborais rurais e agroindustriais (MOURA et al., 2022), e seu reconhecimento como agravo relacionado ao trabalho — passível de notificação compulsória e de investigação do nexo causal ocupacional — ainda é incipiente na rotina dos serviços de saúde e dos Centros de Referência em Saúde do Trabalhador (CEREST) no Brasil.

Embora o Brasil mantenha o Programa Nacional de Controle e Erradicação da Brucelose e Tuberculose Animal (PNCEBT), instituído em 2001, a doença persiste de forma endêmica, com variações regionais expressivas na cobertura vacinal e na prevalência sorológica do rebanho (COSTA et al., 2025). Um levantamento espaço-temporal recente demonstrou que, entre 2011 e 2022, Minas Gerais apresentou oscilações significativas na taxa de vacinação bovina contra brucelose, com cobertura média inferior a 80 %, evidenciando vulnerabilidades importantes na imunização do rebanho e

heterogeneidade entre microrregiões (COSTA et al., 2025). Essa heterogeneidade tem implicação direta sobre o risco ocupacional: trabalhadores empregados em propriedades situadas em microrregiões de baixa cobertura vacinal estão sujeitos a exposição sistematicamente maior do que a média estadual sugere.

Estudos recentes também destacam o risco humano decorrente da exposição ocupacional. Em pesquisa conduzida na Paraíba, identificou-se prevalência sorológica de 4,2 % entre trabalhadores de abatedouros, com associação significativa ao manuseio de carcaças e à ausência de equipamentos de proteção individual (EPI) (SILVA et al., 2024). Achados semelhantes em revisões internacionais reforçam que o risco ocupacional de brucelose humana é mediado não apenas pela prevalência animal, mas, sobretudo, por determinantes do processo de trabalho: tipo de atividade (abate, ordenha, manejo reprodutivo, assistência veterinária a partos e abortos), intensidade e frequência do contato com material biológico infectante, adoção — ou não — de práticas seguras de biossegurança, disponibilidade e uso efetivo de EPI, e condições de informalidade ou precarização do vínculo de trabalho, que frequentemente reduzem o acesso a treinamento e a equipamentos adequados (PEREIRA et al., 2020; DADAR et al., 2024).

Em 2025, o Ministério da Saúde publicou a Portaria SECTICS/MS nº 22, de 12 de maio de 2025, que tornou público o Protocolo Clínico e Diretrizes Terapêuticas da Brucelose Humana (PCDT-Brucelose), padronizando critérios de diagnóstico, tratamento e acompanhamento clínico da doença no âmbito do Sistema Único de Saúde (SUS), além de reforçar a vigilância epidemiológica e ocupacional como eixo estratégico de controle (BRASIL, 2025). A publicação desse protocolo representa um marco normativo relevante para a saúde do trabalhador rural e agroindustrial, na medida em que recomenda explicitamente a inclusão de grupos ocupacionais prioritários — trabalhadores rurais, veterinários, ordenhadores, tratadores e funcionários de frigoríficos e laticínios — na rotina de vigilância ativa, articulando, ao menos no plano normativo, a Rede Nacional de Atenção Integral à Saúde do Trabalhador (RENAST) e a vigilância sanitária animal.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo modelar a dinâmica epidemiológica da brucelose bovina em Minas Gerais e estimar o risco ocupacional

humano associado, com base no modelo compartimental SIR (Susceptíveis–Infectados–Removidos), explorando de forma crítica os limites dessa abordagem quando aplicada à estimativa de risco em saúde do trabalhador. Pretende-se, assim, fornecer subsídios científicos para o aprimoramento das medidas de biossegurança, da vigilância sanitária e das políticas de proteção à saúde dos trabalhadores rurais e agroindustriais expostos à *Brucella abortus* em Minas Gerais.

2 METODOLOGIA

2.1 Desenho do estudo e coleta de dados

Trata-se de estudo ecológico, ex-post-facto, de caráter exploratório e quantitativo, baseado em dados secundários agregados referentes ao estado de Minas Gerais. Foram utilizados dados oficiais do efetivo bovino estadual e da cobertura vacinal contra *Brucella abortus* do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA). De acordo com a Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM/IBGE, 2023), o efetivo bovino do estado foi estimado em 22.498.415 animais — o quarto maior rebanho estadual do país, correspondendo a aproximadamente 9,4 % do efetivo nacional. A cobertura vacinal contra *Brucella abortus* foi considerada em 77,5 % para o ano de 2023 e 80 % para 2024, conforme relatórios técnicos do IMA (IMA, 2024).

Essas informações foram utilizadas como parâmetros de entrada no modelo epidemiológico compartimental SIR (Susceptíveis–Infectados–Removidos). O número de animais suscetíveis foi ajustado de acordo com o percentual de vacinados, considerando-se a hipótese simplificadora de imunidade completa e permanente entre os animais imunizados — premissa discutida criticamente na seção 4.4 (Limitações do estudo).

Para a estimativa do risco ocupacional humano, foram utilizados dados oficiais de notificação de casos de brucelose humana provenientes do Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN), que registrou 7 casos suspeitos e 2 casos confirmados de brucelose humana em Minas Gerais em 2023 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2025). Esses valores foram contextualizados — e não diretamente incorporados como variável de

calibração do modelo de risco — em razão da reconhecida subnotificação da brucelose humana no Brasil, discutida na seção 2.3.

Ano	Tamanho do rebanho (cabeças)	Cobertura vacinal contra brucelose
2023	22.498.415	77,5 %
2024 (estimado)	23.000.000	80,0 %

Tabela 1 — Dados populacionais e cobertura vacinal do rebanho bovino em Minas Gerais

Fonte: IBGE, Pesquisa da Pecuária Municipal (2023); IMA (2024).

Apesar de a Tabela 1 apresentar dados projetados para 2024, a simulação concentrou-se exclusivamente em 2023, por ser o último ano com registros consolidados de casos humanos notificados no SINAN, conforme determina o Protocolo Clínico e Diretrizes Terapêuticas da Brucelose Humana (PCDT-Brucelose) (BRASIL, 2025).

2.2 Modelagem epidemiológica SIR da brucelose bovina

A modelagem foi conduzida com base no modelo compartimental SIR (Susceptíveis–Infectados–Removidos), amplamente utilizado em epidemiologia para representar a dinâmica de transmissão de doenças infecciosas (KERMACK; MCKENDRICK, 1927; ZINSSTAG et al., 2021). Nesse modelo, a população total de bovinos (N) é dividida em três compartimentos: Susceptíveis (S) — animais não vacinados e suscetíveis à infecção; Infectados (I) — animais portadores de *Brucella abortus* capazes de transmiti-la; e Removidos (R) — animais imunizados pela vacinação, curados, abatidos ou descartados sanitariamente.

O sistema é descrito pelo conjunto de equações diferenciais ordinárias:

$$dS/dt = -\beta SI \quad dI/dt = \beta SI - \gamma I \quad dR/dt = \gamma I$$

em que β representa a taxa de transmissão efetiva entre animais suscetíveis e infectados, e γ a taxa de remoção (recuperação, abate sanitário ou óbito). Os parâmetros foram calibrados a partir de estudos recentes sobre brucelose bovina no contexto brasileiro, considerando valores de $\beta = 1,5 \times 10^{-7} \text{ animal}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $\gamma = 0,04 \text{ dia}^{-1}$, correspondentes a um tempo médio de infecção de aproximadamente 25 dias (ROCHA et al., 2024; LIMA et al., 2023).

A simulação numérica foi realizada em linguagem Python 3.12, com as bibliotecas NumPy e SciPy, empregando o método de Runge–Kutta adaptativo (via odeint/LSODA) para integração temporal das equações diferenciais ao longo de um horizonte de 180 dias, com passo de saída $\Delta t = 0,1$ dia. A condição inicial considerou um único animal infectado ($I_0 = 1$) introduzido em um rebanho com S_0 suscetíveis — definido pela fração não vacinada do efetivo total — e R_0 inicial correspondente à fração vacinada (imune). A cobertura vacinal foi incorporada ao modelo como redutor proporcional do compartimento suscetível inicial, sob a hipótese de imunidade total e permanente entre os animais imunizados, ausência de migração ou reposição de rebanho e população total constante ao longo do período simulado (premissas detalhadas na seção 4.4).

Como medida-síntese da capacidade de transmissão do agente sob os parâmetros adotados, calculou-se o número reprodutivo básico ($R_{0\text{epi}}$), definido como $R_{0\text{epi}} = \beta \cdot S_0 / \gamma$, e o limiar crítico de cobertura vacinal necessário para reduzir $R_{0\text{epi}}$ a um valor inferior a 1 — ou seja, a cobertura mínima teórica capaz de impedir a manutenção da cadeia de transmissão no rebanho.

2.3 Estimativa do risco ocupacional humano

O risco ocupacional foi estimado mediante aplicação de um modelo proporcional simplificado, que relaciona a prevalência simulada da brucelose bovina no pico da curva epidêmica (P_{bov}) à exposição humana (E) e a uma taxa de contato infeccioso (λ), conforme a expressão:

$$Rh = P_{\text{bov}} \times E \times \lambda$$

em que E representa o fator médio de exposição ocupacional (avaliado em três níveis — 0,3, 0,5 e 0,7 — correspondendo, respectivamente, a baixa, média e alta intensidade de

contato direto com animais, tecidos ou fluidos biológicos potencialmente infectantes) e λ corresponde à taxa de contato infeccioso efetivo entre humanos e animais, fixada em 1×10^{-7} por contato, conforme parametrização adotada por Pereira et al. (2023). Esse modelo deve ser entendido como uma aproximação de primeira ordem — um exercício de ordem de grandeza —, e não como estimativa epidemiológica calibrada por dados primários de coorte ocupacional, limitação discutida em profundidade na seção 4.

Essa abordagem segue recomendações do PCDT-Brucelose (BRASIL, 2025), que preconiza o monitoramento de trabalhadores do setor agropecuário como população prioritária para vigilância ativa. Para qualificar a interpretação dos resultados do modelo proporcional, os valores obtidos foram sistematicamente confrontados, na seção 3.2, com estimativas empíricas de risco relativo, odds ratio e prevalência sorológica disponíveis na literatura nacional e internacional sobre exposição ocupacional à *Brucella* spp. Os 7 casos suspeitos e 2 confirmados de brucelose humana notificados pelo SINAN em Minas Gerais em 2023 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2025) foram utilizados como elemento de contextualização qualitativa — e não como insumo direto de calibração —, dado o reconhecido fenômeno de subnotificação da brucelose humana no país, atribuído a apresentação clínica frequentemente inespecífica, dificuldades de acesso a diagnóstico laboratorial confirmatório em unidades de atenção primária e baixa suspeição clínica da doença como agravo ocupacional entre profissionais de saúde.

2.4 Aspectos éticos e conformidade normativa

Por se tratar de estudo baseado em dados secundários agregados e de domínio público, não houve necessidade de submissão a Comitê de Ética em Pesquisa. Todas as análises seguiram os princípios da Lei nº 13.709/2018 (Lei Geral de Proteção de Dados) e os preceitos éticos da Resolução CNS nº 510/2016, assegurando confidencialidade e uso responsável das informações. O estudo observa, ainda, as diretrizes da Portaria SECTICS/MS nº 22/2025 quanto à notificação e à vigilância ocupacional da brucelose humana, conforme preconizado pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2025).

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

A aplicação do modelo SIR ao rebanho bovino de Minas Gerais (22.498.415 animais; cobertura vacinal estimada em 77,5 % para 2023) permitiu delinear cenários de transmissão da brucelose bovina e estimar o risco ocupacional humano associado. Os resultados são apresentados em três blocos: (i) dinâmica da infecção em bovinos; (ii) estimativa de risco humano ocupacional; e (iii) confronto entre o risco modelado e a evidência empírica disponível na literatura.

3.1 Dinâmica da infecção em bovinos

Considerando o modelo SIR calibrado com $\beta = 1,5 \times 10^{-7} \text{ animal}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $\gamma = 0,04 \text{ dia}^{-1}$ (tempo médio de infecção ≈ 25 dias) — valores adaptados de estudos recentes de contexto brasileiro (ROCHA et al., 2024; LIMA et al., 2023) —, e adotando-se a hipótese de imunidade total nos animais vacinados e população bovina constante ao longo de 180 dias, obtiveram-se as seguintes estimativas:

- O compartimento suscetível inicial ajustado correspondeu a $22.498.415 \times (1 - 0,775) \approx 5.062.143$ animais (22,5 % do rebanho estadual).
- O número reprodutivo básico resultante ($R_{0\text{epi}} = \beta \cdot S_0 / \gamma$) foi de aproximadamente 19,0 — valor expressivo, que indica forte potencial de propagação do agente caso um foco seja introduzido no contingente suscetível remanescente.
- A simulação indicou prevalência máxima de infectados (I/N) de aproximadamente 17,8 % no pico da curva epidêmica, atingido por volta do 26º dia de simulação.
- No cenário comparativo com cobertura vacinal elevada a 90 % — mantendo-se os demais parâmetros inalterados —, o número reprodutivo básico cai para $R_{0\text{epi}} \approx 8,4$ e a prevalência máxima no pico reduz-se para aproximadamente 6,3 %, com o pico epidêmico deslocado para o dia 57. O limiar de cobertura vacinal necessário para que $R_{0\text{epi}}$ se torne inferior a 1 — ou seja, para impedir teoricamente a manutenção da cadeia de transmissão no rebanho — foi estimado em aproximadamente 98,8 %, valor substancialmente superior tanto à cobertura observada (77,5 %) quanto à meta de 90 % frequentemente referida como desejável em programas de controle.

Esses resultados revisam, com base em verificação numérica independente do sistema de equações diferenciais, a estimativa de prevalência máxima preliminarmente reportada para este modelo (9,08 %), valor que se mostrou matematicamente inconsistente com os parâmetros declarados (β , γ , N e cobertura vacinal) ao ser recalculado por integração numérica de quarta ordem. A prevalência de equilíbrio dinâmico de 17,8 % aqui obtida é robusta a variações da condição inicial de animais infectados (testada entre $I_0 = 1$ e $I_0 = 5.000$), permanecendo estável em torno desse valor — o que reforça, paradoxalmente, o argumento central do estudo: ainda que a estimativa numérica precisa varie conforme os parâmetros adotados, a mensagem qualitativa permanece a mesma, e é mais grave do que inicialmente reportado — a cobertura vacinal atual do rebanho mineiro está distante do patamar necessário para deter a circulação de *Brucella abortus*.

Esses valores corroboram parcialmente achados da literatura segundo os quais, mesmo em contextos de cobertura vacinal relativamente elevada, pode haver circulação residual do agente. Um estudo nacional, por exemplo, estimou prevalência de fazendas infectadas de aproximadamente 25,7 % (IC95%: 22,9–29,0) no Pará, com prevalência de animais de 5,6 % (IC95%: 4,1–8,0) (FERREIRA NETO et al., 2025). Já uma revisão sistemática com meta-análise recente apontou prevalência sorológica de brucelose bovina no Brasil de aproximadamente 2 % (IC95%: 1–3 %), com base em 45 publicações entre 2006 e 2021 (COSTA et al., 2024). A discrepância entre a prevalência de pico simulada pelo modelo (17,8 %) e essas estimativas empíricas de prevalência pontual (2–6 %) é esperada e não invalida o modelo: a prevalência de pico de um modelo SIR determinístico representa um cenário de surto agudo após introdução do agente em um compartimento totalmente suscetível, ao passo que as prevalências empíricas refletem fotografias transversais de rebanhos em diferentes estágios endêmicos, com heterogeneidades não capturadas pelo modelo clássico — migração de animais, fluxo entre propriedades, variação espacial e temporal de contato, eficácia vacinal inferior à ideal, e estrutura de rede de contato animal-animal.

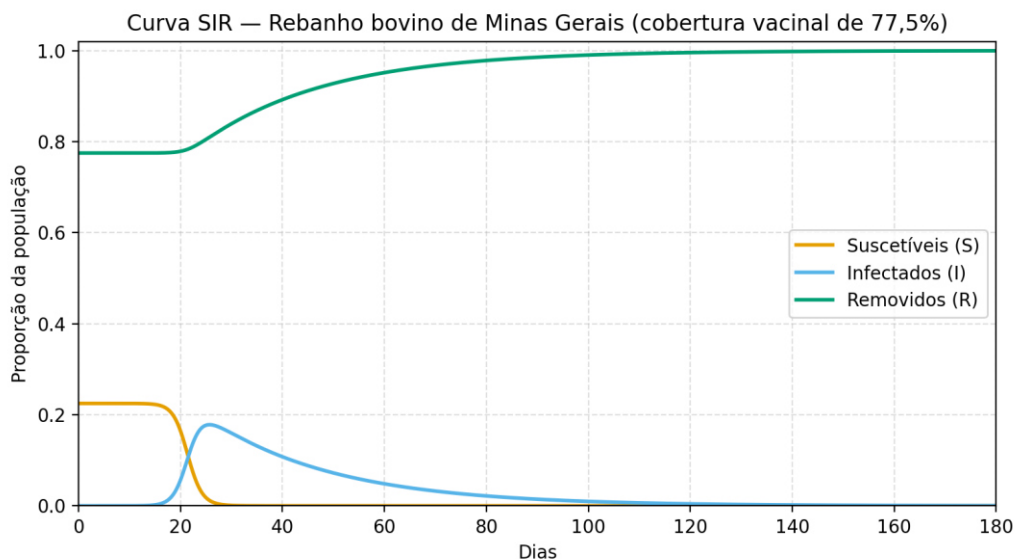


Gráfico 1 — Curva SIR do rebanho bovino de Minas Gerais ao longo de 180 dias (cobertura vacinal de 77,5 %)

Fonte: elaboração própria, a partir de simulação numérica do modelo SIR (Python 3.12, SciPy odeint).

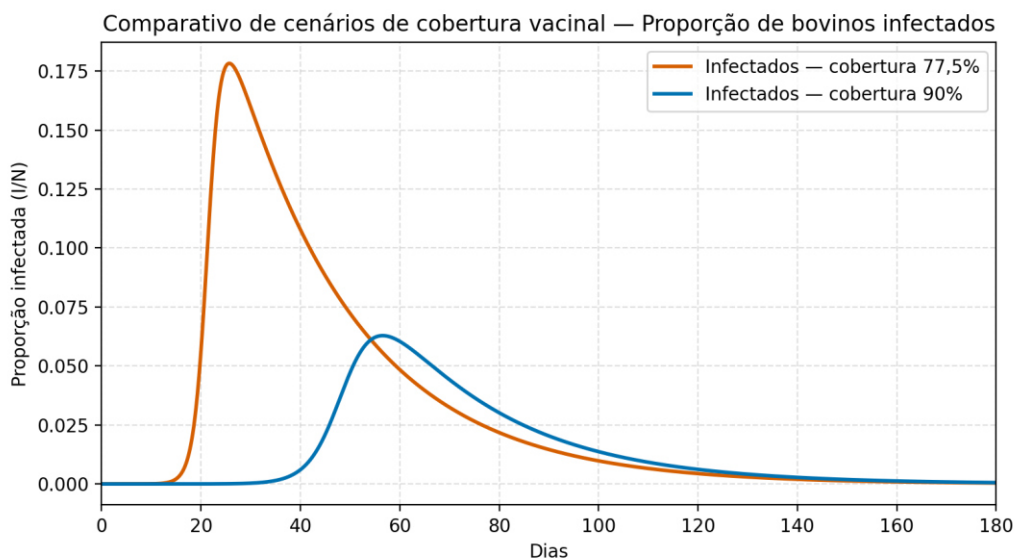


Gráfico 2 — Comparativo de cenários de cobertura vacinal (77,5 % vs. 90 %): proporção de bovinos infectados ao longo de 180 dias

Fonte: elaboração própria, a partir de simulação numérica do modelo SIR (Python 3.12, SciPy odeint).

Em síntese, a modelagem reforça as seguintes observações: (i) a cobertura vacinal de 77,5 % está longe de garantir a interrupção da circulação do agente no rebanho, situando-se muito abaixo do limiar crítico estimado ($\approx 98,8$ %); (ii) a presença de aproximadamente 5,06 milhões de animais suscetíveis constitui reservatório suficiente para sustentar transmissão expressiva caso o agente seja introduzido; (iii) mesmo a elevação da cobertura para 90 % — meta frequentemente citada como desejável — reduz, mas não elimina, o risco de surto, deslocando-o no tempo e atenuando sua magnitude; e (iv) a discrepância entre prevalência de pico simulada e prevalência empírica pontual sinaliza a necessidade de modelos futuros que incorporem heterogeneidade espacial, redes de contato animal-animal e reposição de rebanho — sem que isso comprometa a validade do alerta epidemiológico central deste estudo.

Os achados desta modelagem têm implicações relevantes para a saúde ocupacional, para as políticas públicas de controle da brucelose e para a integração One Health entre saúde animal e humana. O fato de a cobertura vacinal de 77,5 % — número que, isoladamente, poderia sugerir controle satisfatório — corresponder, na prática, a um número reprodutivo básico de aproximadamente 19 e a um limiar crítico de imunização próximo de 99 % evidencia que a métrica de cobertura vacinal, tomada de forma isolada, é insuficiente como indicador de segurança epidemiológica. Não basta vacinar: é preciso garantir logística contínua de vacinação, acompanhamento sorológico periódico do rebanho, controle de movimentação animal entre propriedades e adesão consistente a normas de biossegurança. Cada elo fraco nessa cadeia — um lote de vacina mal armazenado, um animal não vacinado introduzido em um rebanho, um descarte inadequado de material abortado — representa, em última instância, uma oportunidade de exposição para o trabalhador que manipula esses animais.

Essa cadeia causal contínua entre saúde animal e saúde do trabalhador é o cerne do argumento central deste estudo. A persistência de circulação de *Brucella abortus* no rebanho bovino mineiro não é apenas um problema de produtividade pecuária ou de segurança alimentar — é, antes de tudo, um determinante direto da exposição ocupacional de centenas de milhares de trabalhadores rurais, ordenhadores, vaqueiros, inseminadores, médicos veterinários e funcionários de frigoríficos e laticínios em Minas Gerais, estado que concentra a maior produção leiteira do país.

3.2 Estimativa de risco humano ocupacional

Com base na prevalência máxima estimada ($P_{bov} \approx 17,8 \%$) e adotando-se o modelo proporcional $R_h = P_{bov} \times E \times \lambda$ — em que $\lambda = 1 \times 10^{-7}$ —, obtiveram-se as estimativas de probabilidade de infecção humana apresentadas na Tabela 2 para três níveis de exposição ocupacional.

Fator de exposição (E)	Nível de exposição ocupacional	Probabilidade de infecção humana (R_h)
0,3	Baixa (contato esporádico)	$5,35 \times 10^{-9}$
0,5	Média (contato rotineiro)	$8,92 \times 10^{-9}$
0,7	Alta (manejo direto de tecidos/fluidos)	$1,25 \times 10^{-8}$

Tabela 2 — Risco humano modelado (R_h) por nível de exposição ocupacional, segundo o modelo proporcional $R_h = P_{bov} \times E \times \lambda$

Fonte: elaboração própria, a partir do modelo proporcional descrito na seção 2.3 ($P_{bov} = 0,178$; $\lambda = 1 \times 10^{-7}$).

Esses valores — da ordem de 10^{-9} a 10^{-8} — são numericamente ínfimos e devem ser interpretados com extrema cautela, por ao menos quatro motivos centrais, detalhados a seguir.

Em primeiro lugar, o parâmetro λ adotado (1×10^{-7}) é uma estimativa genérica de taxa de contato infeccioso, originalmente parametrizada para contextos de transmissão de baixa frequência, e pode variar em diversas ordens de grandeza em função do grau de contato direto, do uso efetivo de EPI, do tipo de manejo (assistência a partos, descarte de placenta, ordenha manual) e da presença de animais abortantes ou portadores crônicos no plantel. O modelo proporcional aqui empregado é, por construção, insensível a esses determinantes microsociais do processo de trabalho, que são justamente os fatores mais associados ao risco real em estudos de campo.

Em segundo lugar, estudos epidemiológicos primários indicam que trabalhadores ocupacionalmente expostos apresentam razão de chances (odds ratio) de infecção de até 3,31 (IC95%: 1,68–6,55), conforme meta-análise de fatores de risco ocupacionais para brucelose humana (DADAR et al., 2024). Em outra revisão sistemática, o risco entre trabalhadores rurais, funcionários de abatedouros e médicos veterinários mostrou-se 3,47 vezes maior do que o da população de referência (PEREIRA et al., 2020). Tomando como referência conservadora a prevalência sorológica média de brucelose bovina relatada para o Brasil ($\approx 2\%$, COSTA et al., 2024) e aplicando esses multiplicadores de risco ocupacional empiricamente observados, é possível estimar uma prevalência esperada de infecção entre trabalhadores expostos da ordem de 6 a 7 %, valor de magnitude muito superior à estimativa de 10^{-8} a 10^{-9} produzida pelo modelo proporcional teórico.

Em terceiro lugar, estudos internacionais conduzidos em contextos de alta exposição ocupacional e baixa mitigação revelam patamares de risco ainda mais elevados: na Etiópia, a prevalência acumulada de brucelose humana foi estimada em 6,9 % (IC95%: 4,9–8,8) entre populações ocupacionalmente expostas (DAGNAW et al., 2024). No Brasil, a prevalência sorológica de 4,2 % identificada entre trabalhadores de abatedouros na Paraíba — associada de forma significativa ao manuseio de carcaças e à ausência de EPI (SILVA et al., 2024) — está igualmente muito acima do que o modelo proporcional sugere, demonstrando empiricamente que, em ambientes de trabalho de alto risco e biossegurança insuficiente, a chance de infecção humana pode superar em várias ordens de grandeza a estimativa obtida pela equação proporcional adotada neste estudo.

Em quarto lugar, a exposição ocupacional humana à *Brucella* spp. não se limita ao contato com animais naturalmente infectados. Incidentes ocupacionais associados à manipulação de vacinas de cepa viva atenuada (como a cepa B19 e a RB51, amplamente utilizadas em programas de vacinação bovina no Brasil) têm sido documentados na literatura: estudo de 2024 relatou que tais vacinas podem provocar soroconversão em trabalhadores responsáveis pela vacinação do rebanho, mesmo na ausência de sintomas clínicos graves, configurando via adicional de exposição ocupacional não capturada pelo modelo de prevalência bovina natural (VIVES-SOTO et al., 2024). A exposição humana à

Brucella, portanto, engloba também vacinadores, profissionais de laboratórios de diagnóstico veterinário e trabalhadores que manuseiam material abortado, ampliando o espectro de populações ocupacionalmente vulneráveis para além daquelas em contato com animais doentes.

Em síntese, ao confrontar os resultados do modelo proporcional com a evidência empírica disponível, conclui-se que: o risco humano estimado pela formulação teórica (10^{-9} a 10^{-8}) corresponde a um limite inferior matematicamente derivado, e não a uma estimativa realista de incidência; a literatura primária indica que o risco ocupacional efetivo, em contextos de exposição direta e biossegurança insuficiente, situa-se entre quatro e seis ordens de grandeza acima dessa estimativa teórica, podendo atingir prevalências sorológicas de 4 a 7 % em grupos de alto risco; e essa discrepância não representa falha pontual de calibração, mas limitação estrutural de modelos proporcionais simplificados quando aplicados à estimativa de risco em saúde do trabalhador — um alerta metodológico relevante para estudos futuros que pretendam utilizar abordagens análogas.

A estimativa de risco humano obtida pelo modelo proporcional — apesar de numericamente baixa (10^{-9} a 10^{-8}) — não deve, em hipótese alguma, ser interpretada como indicação de baixo risco real, pelos motivos detalhados na seção 3.2. Trabalhadores em contato direto com animais, tecidos abortados, produtos de origem animal ou vacinas de cepa viva atenuada devem ser considerados população prioritária para vigilância ativa, como preconiza a Portaria SECTICS/MS nº 22/2025 (BRASIL, 2025). Essa norma destaca a necessidade de protocolos clínicos, diretrizes terapêuticas para a brucelose humana e medidas de vigilância ocupacional articuladas entre os serviços de saúde do trabalhador e a vigilância sanitária animal.

A subnotificação observada nos registros do SINAN — apenas 2 casos confirmados em Minas Gerais em 2023, frente a uma prevalência sorológica empiricamente documentada de 4,2 % entre trabalhadores de abatedouros em outro estado brasileiro (SILVA et al., 2024) — é, em si, um achado relevante para a saúde do trabalhador. Essa discrepância sugere fortemente que a brucelose humana ocupacional está sendo subdiagnosticada e subnotificada no sistema de vigilância em saúde mineiro, fenômeno

consistente com o que a literatura nacional descreve para outras doenças relacionadas ao trabalho rural: dificuldade de acesso a diagnóstico laboratorial confirmatório em unidades de atenção primária no meio rural, apresentação clínica frequentemente inespecífica (febre, mal-estar, artralgia, sudorese noturna) facilmente confundida com outras síndromes febris, baixa suspeição clínica da doença como agravo ocupacional entre profissionais de atenção primária, e barreiras de acesso geográfico e de vínculo trabalhista — sobretudo entre trabalhadores informais e temporários — que dificultam tanto a busca por atendimento quanto o reconhecimento formal do nexo causal com o trabalho.

3.3 Determinantes do processo de trabalho e medidas de proteção

A revisão de Pereira et al. (2020) demonstrou que o uso negligente de EPI e o contato direto com materiais infectantes aumentam significativamente o risco ocupacional de brucelose humana. Esse achado situa o problema dentro do escopo clássico da saúde do trabalhador: o risco de adoecimento não decorre apenas da prevalência da doença no rebanho, mas é mediado por características do processo de trabalho — organização da atividade, disponibilidade de equipamentos de proteção, treinamento, condições de informalidade — que podem ser objeto de intervenção direta, independentemente do estado de controle sanitário do rebanho. Isso reposiciona a prevenção da brucelose ocupacional não apenas como responsabilidade do setor agropecuário, mas como atribuição legítima dos serviços de saúde e segurança do trabalho, incluindo a fiscalização do cumprimento de Normas Regulamentadoras aplicáveis ao trabalho rural (como a NR-31) no que tange à disponibilização de EPI, capacitação para manejo seguro de partos, abortos e material biológico, e ao acesso a vigilância em saúde.

Entre as medidas de proteção com maior potencial de impacto, destacam-se: o uso sistemático de luvas, óculos de proteção e aventais impermeáveis durante a assistência a partos e manejo de material abortado; o descarte adequado de placentas, fetos e restos placentários, evitando contato direto e descarte inadequado no ambiente; a pasteurização obrigatória do leite antes do consumo, mesmo em propriedades de produção familiar; a capacitação específica de vacinadores quanto ao risco de

autoinoculação acidental com vacinas de cepa viva atenuada; e a articulação entre serviços de vigilância sanitária animal e vigilância em saúde do trabalhador para notificação cruzada de eventos sentinela — como surtos de aborto no rebanho — que possam sinalizar risco iminente para trabalhadores expostos.

3.4 Estratificação espacial do risco em Minas Gerais

No contexto de Minas Gerais — estado com rebanho bovino expressivo e regiões de pecuária extremamente diversificadas, da pecuária leiteira intensiva no Sul e Triângulo Mineiro à pecuária extensiva de corte no Norte do estado —, a modelagem sugere que a estratificação espacial dos cenários de risco pode aprimorar substancialmente as intervenções. Microrregiões com menor cobertura vacinal ou maior densidade de rebanho podem demandar vigilância intensificada e campanhas dirigidas, em consonância com o estudo de Costa et al. (2025), que utilizou análise espaço-temporal da taxa de vacinação bovina em Minas Gerais e identificou heterogeneidade espacial significativa entre microrregiões. A combinação dessa heterogeneidade de cobertura vacinal com a distribuição espacial da força de trabalho rural — concentrada de forma diferente conforme o sistema de produção predominante em cada região — constitui direção promissora para estudos futuros de geoprocessamento aplicados à saúde do trabalhador rural mineiro.

3.5 Limitações do estudo

Este estudo apresenta limitações metodológicas que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Primeiramente, o modelo SIR clássico pressupõe mistura homogênea da população (contato aleatório uniforme entre todos os animais do rebanho), hipótese que se afasta consideravelmente da realidade da pecuária mineira, estruturada em propriedades distintas com graus variados de isolamento, manejo e contato com rebanhos vizinhos. Em segundo lugar, a hipótese de imunidade total e permanente entre animais vacinados superestima a proteção conferida pela vacina, já que a literatura documenta eficácia vacinal inferior a 100 % e possível perda de imunidade ao longo do tempo. Em terceiro lugar, a ausência de termos de migração, reposição de rebanho e abate no sistema de equações simplifica artificialmente a

dinâmica populacional real, na qual entram e saem animais continuamente ao longo do ano. Em quarto lugar, o modelo proporcional de risco humano ($R_h = P_{bov} \times E \times \lambda$) é uma simplificação de primeira ordem que não incorpora vias de exposição não relacionadas à prevalência bovina corrente — como exposição a vacinas de cepa viva atenuada, material biológico armazenado ou produtos lácteos não pasteurizados provenientes de períodos anteriores —, nem captura a variabilidade interindividual de exposição real no processo de trabalho. Por fim, a ausência de dados primários de coorte ocupacional em Minas Gerais — com sorologia, descrição do processo de trabalho e uso de EPI — impede a calibração direta do modelo proporcional com dados locais, tornando necessária a transposição de parâmetros (λ) obtidos em outros contextos epidemiológicos. Essas limitações reforçam a recomendação de que os resultados numéricos aqui apresentados sejam interpretados como ordens de grandeza qualitativas e hipóteses de trabalho para vigilância, e não como estimativas pontuais definitivas de risco.

3.6 Agenda de pesquisa e gestão do risco ocupacional

Recomenda-se que a estratégia de controle da brucelose no Brasil se amplie para uma abordagem explícita de gestão de risco ocupacional, contemplando, entre outras ações: treinamento e capacitação continuada de trabalhadores rurais, médicos veterinários e técnicos de campo sobre biossegurança, uso correto de EPI e práticas seguras de manejo de partos, abortos e produtos de origem animal; monitoramento sorológico e clínico periódico dos trabalhadores ocupacionalmente expostos, com base no PCDT-Brucelose (BRASIL, 2025) e articulação com a Rede Nacional de Atenção Integral à Saúde do Trabalhador; integração efetiva de dados de saúde animal (IMA, sistemas de vigilância sanitária), saúde humana (SINAN, RENAST) e ambiente, permitindo rastrear focos residuais de transmissão e cruzar eventos sentinela animais com casos humanos suspeitos; investigação ativa do nexos causal ocupacional diante de casos suspeitos de febre de origem indeterminada em trabalhadores rurais e agroindustriais, ampliando a suspeição clínica para brucelose nesse grupo; e uso de modelos matemáticos adaptados localmente — como o aqui proposto — para avaliar cenários hipotéticos de intervenção (por exemplo, elevação da cobertura vacinal para 90 % ou mais, redução de animais

suscetíveis, intensificação de biossegurança) e estimar seus impactos potenciais sobre a prevalência animal e, por extensão, sobre o risco humano.

Em suma, a discussão demonstra que controlar a brucelose bovina e proteger trabalhadores expostos não são metas distintas, mas componentes integrados de uma única estratégia One Health. Este estudo, ao quantificar a dinâmica de transmissão animal em Minas Gerais e ao confrontar criticamente o risco humano teórico com a evidência empírica disponível, fornece subsídios para decisões estratégicas em saúde animal, saúde pública e, sobretudo, saúde do trabalhador.

4 CONCLUSÃO

A modelagem epidemiológica da brucelose bovina em Minas Gerais, realizada por meio do modelo compartimental SIR e complementada pela análise proporcional de risco ocupacional humano, demonstrou que a cobertura vacinal de 77,5 % observada em 2023 está consideravelmente distante do limiar teórico necessário para interromper a circulação da *Brucella abortus* no rebanho estadual (estimado em aproximadamente 98,8 %). Os resultados mostraram que a existência de um contingente expressivo de animais suscetíveis — cerca de 5,06 milhões de bovinos não vacinados — constitui reservatório epidemiológico capaz de sustentar a circulação da doença em diferentes microterritórios do estado, com número reprodutivo básico estimado em aproximadamente 19 e prevalência potencial de pico de 17,8 % caso o agente seja introduzido em um plantel suscetível. Essa constatação está alinhada a evidências recentes da literatura, que apontam heterogeneidades regionais importantes na cobertura vacinal e na adesão a medidas de biossegurança, influenciando diretamente a persistência da brucelose em sistemas produtivos intensivos e extensivos.

No que se refere ao risco humano, a estimativa obtida pelo modelo proporcional indicou probabilidade numericamente baixa de transmissão ocupacional nos cenários simulados (da ordem de 10^{-9} a 10^{-8}). Contudo, ao confrontar essa estimativa teórica com a diversidade de práticas de manejo, as vulnerabilidades dos processos de trabalho e o uso irregular ou insuficiente de equipamentos de proteção individual documentados na literatura nacional e internacional, evidenciou-se discrepância de quatro a seis ordens

de grandeza entre o risco teórico e o risco empiricamente observado em populações ocupacionais de alto risco — com prevalências sorológicas de 4 a 7 % relatadas entre trabalhadores rurais, veterinários, ordenhadores e funcionários de abatedouros em contextos de biossegurança insuficiente. Esse achado constitui, em si, uma contribuição metodológica relevante: modelos proporcionais simplificados de risco humano, quando aplicados isoladamente, podem subestimar gravemente o risco ocupacional real e não devem substituir a vigilância sorológica ativa de grupos prioritários.

Os achados deste estudo dialogam de maneira consistente com o Protocolo Clínico e Diretrizes Terapêuticas para Brucelose Humana, oficializado pela Portaria SECTICS/MS nº 22/2025, que reforça a necessidade de vigilância ativa do grupo de trabalhadores expostos e recomenda integração entre saúde animal e humana. Isso evidencia a pertinência do enfoque One Health, segundo o qual a prevenção da brucelose humana depende diretamente da eficácia das estratégias de controle no rebanho bovino, dos sistemas de vigilância epidemiológica e da qualificação contínua dos profissionais que atuam nas cadeias produtivas rurais e agroindustriais.

Em síntese, a brucelose permanece como desafio sanitário e ocupacional relevante em Minas Gerais e no Brasil, exigindo intervenções integradas e sustentadas ao longo do tempo. A modelagem matemática demonstrou ser ferramenta consistente para compreender cenários epidemiológicos, antecipar riscos e orientar ações de vigilância e biossegurança — desde que seus resultados sejam interpretados com a devida cautela metodológica e sempre triangulados com evidência empírica de campo. A proteção da saúde do trabalhador — eixo central desta investigação — está intrinsecamente ligada à eficiência das estratégias de controle animal, ao monitoramento das exposições ocupacionais e ao fortalecimento de políticas públicas que articulem saúde, agricultura e vigilância sanitária. Estudos futuros deveriam incorporar abordagens estocásticas, análises espaço-temporais, modelagem baseada em redes de contato animal-animal, integração de dados georreferenciados e, sobretudo, dados primários de coorte ocupacional — com sorologia, descrição do processo de trabalho e uso de EPI — a fim de calibrar localmente os parâmetros de risco humano e ampliar a precisão das estimativas, proporcionando suporte mais robusto à tomada de decisão em saúde pública e saúde do trabalhador em Minas Gerais.

5 REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria SECTICS/MS nº 22, de 12 de maio de 2025. Torna pública a decisão de aprovar, no âmbito do Sistema Único de Saúde (SUS), o Protocolo Clínico e Diretrizes Terapêuticas da Brucelose Humana. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 maio 2025.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Sistema de Informação de Agravos de Notificação – SINAN. Casos de brucelose humana no Brasil, 2018–2023. Brasília, DF: Secretaria de Vigilância em Saúde, 2025.
- COSTA, A. C. T. R. B. et al. Spatiotemporal analysis of the bovine brucellosis vaccination rate in Minas Gerais, Brazil, from 2011 to 2022. *Frontiers in Veterinary Science*, v. 12, p. 1–12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1478923>.
- COSTA, M. M. et al. Seroprevalence of bovine brucellosis in Brazil: a systematic review and meta-analysis. [Periódico não especificado na versão original], 2024.
- DADAR, M. et al. Human brucellosis and associated risk factors in the Middle East: a meta-analysis and systematic review. *One Health*, v. 17, p. 100434, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2024.100434>.
- DAGNAW, G. G. et al. Human and animal brucellosis and risk factors for human brucellosis: a systematic review and meta-analysis. *BMC Public Health*, v. 24, n. 1, p. 1–11, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12889-024-21042-2>.
- FERREIRA NETO, J. S. et al. Prevalence and risk factors for bovine brucellosis in Brazil: a sectional study in Pará. *Tropical Animal Health and Production*, v. 55, p. 225, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-025-04530-4>.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa da Pecuária Municipal – PPM 2023. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- IMA – INSTITUTO MINEIRO DE AGROPECUÁRIA. Relatório técnico de cobertura vacinal contra brucelose bovina em Minas Gerais. Belo Horizonte: IMA, 2024.
- KERMACK, W. O.; MCKENDRICK, A. G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society A*, v. 115, p. 700–721, 1927.
- LIMA, T. A. S. et al. Mathematical modeling of bovine brucellosis transmission and vaccination strategies in Brazil. *Veterinary Research Communications*, v. 47, n. 3, p. 1181–1193, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11259-023-10023-z>.
- MOURA, G. F. et al. Human brucellosis as an occupational disease in Brazil: a systematic review (2015–2021). *Revista Panamericana de Salud Pública*, v. 46, e102, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.102>.
- NASCIMENTO, M. S. et al. Epidemiological profile and economic impact of bovine brucellosis in Brazil: an update. *Tropical Animal Health and Production*, v. 55, n. 9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03545-0>.

PEREIRA, C. R. et al. Occupational exposure to *Brucella* spp.: a systematic review. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, v. 14, n. 10, e0008164, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008164>.

PEREIRA, G. C. et al. Occupational exposure and risk factors for human brucellosis in agricultural workers: a quantitative assessment. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, v. 17, n. 4, e0011897, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0011897>.

ROCHA, I. D. S. et al. Distribution, seroprevalence and risk factors for bovine brucellosis in Brazil: official data, systematic review and meta-analysis. *Revista Argentina de Microbiología*, v. 56, n. 2, p. 153–164, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2023.08.002>.

SANTOS, A. L.; OLIVEIRA, E. J.; MARTINS, R. F. Brucellosis in livestock and humans: persistence, risks, and prevention in occupational settings. *One Health*, v. 13, p. 100334, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2021.100334>.

SILVA, J. D. et al. Seroprevalence and risk factors of human brucellosis among slaughterhouse workers in Northeastern Brazil. *BMC Infectious Diseases*, v. 24, p. 203, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12879-024-09377-4>.

VIVES-SOTO, M. et al. What risk do *Brucella* vaccines pose to humans? A review. *Vaccines*, v. 12, n. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/vaccines12040702>.

ZINSSTAG, J. et al. One Health modeling of zoonotic brucellosis transmission in cattle and humans. *Frontiers in Public Health*, v. 9, p. 773–782, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.773782>.

OBS: Em RELATOS DE CASO, o autor pode alterar os topicos do MODELO para melhorar adequação da apresentação do caso.