

Situação: O preprint foi submetido para publicação em um periódico

Mapeamento dinâmico da probabilidade de infestação por vetores urbanos de arbovírus nos municípios do Rio Grande do Sul, 2016-2017

André Luís Luza, Carolina Brandt Gualdi, Lúcia Maria Lopes de Almeida Guedes Diefenbach, Lavinia Schüller-Faccini, Gonçalo Ferraz

<https://doi.org/10.1590/S1679-49742021000200006>

Este preprint foi submetido sob as seguintes condições:

- O autor submissor declara que todos os autores responsáveis pela elaboração do manuscrito concordam com este depósito.
- Os autores declaram que estão cientes que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do preprint e que o depósito no SciELO Preprints não significa nenhum compromisso de parte do SciELO, exceto sua preservação e disseminação.
- Os autores declaram que a pesquisa que deu origem ao manuscrito seguiu as boas práticas éticas e que as necessárias aprovações de comitês de ética de pesquisa estão descritas no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que os necessários Termos de Consentimento Livre e Esclarecido de participantes ou pacientes na pesquisa foram obtidos e estão descritos no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que a elaboração do manuscrito seguiu as normas éticas de comunicação científica.
- Os autores declaram que o manuscrito não foi depositado e/ou disponibilizado previamente em outro servidor de preprints.
- Os autores declaram que no caso deste manuscrito ter sido submetido previamente a um periódico e estando o mesmo em avaliação receberam consentimento do periódico para realizar o depósito no servidor SciELO Preprints.
- O autor submissor declara que as contribuições de todos os autores estão incluídas no manuscrito.
- O manuscrito depositado está no formato PDF.
- Os autores declaram que caso o manuscrito venha a ser postado no servidor SciELO Preprints, o mesmo estará disponível sob licença [Creative Commons CC-BY](#).
- Caso o manuscrito esteja em processo de revisão e publicação por um periódico, os autores declaram que receberam autorização do periódico para realizar este depósito.

Submetido em (AAAA-MM-DD): 2020-12-18

Postado em (AAAA-MM-DD): 2021-01-07



Como citar este artigo:

Luza AL, Gualdi CB, Diefenbach LML, Schüler-Faccini L, Ferraz G. Mapeamento dinâmico da probabilidade de infestação por vetores urbanos de arbovírus nos municípios do Rio Grande do Sul, 2016-2017. *Epidemiol Serv Saúde* [preprint]. 2020 [citado 2021 jan 7]:[23 p.]. Disponível em: 10.1590/S1679-49742021000200006

Artigo original

Mapeamento dinâmico da probabilidade de infestação por vetores urbanos de arbovírus nos municípios do Rio Grande do Sul, 2016-2017*

Dynamic mapping of the probability of infestation by arbovirus urban vectors in the municipalities of Rio Grande do Sul state, Brazil, 2016-2017

Mapeo dinámico de la probabilidad de infestación por vectores urbanos de arbovirus en los municipios de Rio Grande do Sul, Brasil, 2016-2017

André Luís Luza¹ - orcid.org/0000-0003-0302-529X

Carolina Brandt Gualdi² - orcid.org/0000-0002-9812-4954

Lúcia Maria Lopes de Almeida Guedes Diefenbach² - orcid.org/0000-0003-2691-6570

Lavinia Schüler-Faccini³ - orcid.org/0000-0002-2428-0460

Gonçalo Ferraz¹ - orcid.org/0000-0001-8748-0462

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Ecologia, Porto Alegre, RS, Brasil

²Governo do Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria de Estado de Saúde, Centro Estadual de Vigilância em Saúde, Porto Alegre, RS, Brasil

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Genética, Porto Alegre, RS, Brasil

Endereço para correspondência:

André Luís Luza – Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil. CEP: 91501-970

E-mail: luza.andre@gmail.com

Recebido em 24/04/2020

Aprovado em 23/09/2020

Editora associada: Tatiana Mingote Ferreira de Ázara - orcid.org/0000-0001-9754-9988

Resumo

Objetivo: Comparar o mapeamento oficial com um mapeamento probabilístico da infestação por *Aedes* spp. nos municípios do Rio Grande do Sul, Brasil. **Métodos:** Estudo ecológico com dados de amostras de criadouros em 2016-2017; obteve-se a classificação oficial em boletins epidemiológicos e estimou-se a probabilidade de infestação por município e semana, ajustando-se um modelo dinâmico de ocupação de sítios aos dados da vigilância epidemiológica municipal. **Resultados:** 187.245 amostras coletadas em 473 municípios originaram 10.648 detecções de *Aedes aegypti* e 8.414 de *Aedes albopictus*; o mapeamento oficial concorda com o probabilístico em municípios da região noroeste e oeste do RS; os mapeamentos discordam nas regiões leste, centro, nordeste e sul, revelando municípios oficialmente não infestados com alta probabilidade de infestação e notificação de arboviroses. **Conclusão:** A classificação oficial identificou infestação nos municípios infestados do noroeste e oeste; e não identificou infestação em municípios com possíveis falsos zeros e onde ela varia temporalmente.

Palavras-chave: Aedes; Estudos Ecológicos; Modelos Teóricos; Vetores de Doenças; Vigilância Epidemiológica.

Abstract

Objective: To compare the official mapping with the probabilistic mapping of infestation by *Aedes* spp. in Rio Grande do Sul municipalities, Brazil. **Methods:** Ecological study analyzing samples of mosquito breeding sites collected in 2016-2017; official classification was obtained from epidemiological reports, and infestation per municipality and week was estimated by fitting a dynamic site-occupancy model to data from municipal epidemiological surveillance. **Results:** 187,245 samples collected in 473 municipalities returned 10,648 detections of *Aedes aegypti*, and 8,414 detections of *Aedes albopictus*.; official mapping agrees with the probabilistic mapping in municipalities from northwestern and western regions. These mappings disagree in eastern, center, northeastern and southern regions, revealing municipalities not officially infested with high infestation probability and notification of arbovirus. **Conclusion:** While official classification correctly identifies critically infested municipalities from northwestern and western regions, it did not identify infestation in municipalities with false negative errors and where infestation varies over time.

Keywords: Aedes; Disease Vectors; Ecological Studies; Epidemiological Surveillance; Theoretical Models.

Introdução

Os dados de monitoramento entomológico são úteis para o mapeamento da distribuição de vetores de doenças, porém costumam apresentar variação de esforço amostral entre locais monitorados.¹⁻³ Modelos hierárquicos de ocupação de sítios permitem mapear e prever a probabilidade de ocorrência de espécies, em função do ambiente e imperfeições no processo amostral.⁴ Sua aplicação a dados de monitoramento tem resultado em avanços de conhecimento ecológico,⁵ econômico³ e epidemiológico.^{1,2} De especial interesse é o mapeamento da distribuição dos mosquitos *Aedes (Stegomyia) aegypti* e *Aedes (Stegomyia) albopictus*, principais vetores urbanos das arbovirose

dengue, Zika e chikungunya.^{2,6-8} A distribuição dessas espécies ainda é incerta, principalmente em regiões infestadas recentemente.^{9,10} Sua presença preocupa os agentes de Saúde Pública,^{11,12} que têm na vigilância e controle as mais importantes ferramentas para a prevenção dessas infecções.^{1,7,13}

O Brasil eliminou o *Ae. aegypti* na década de 1950.^{10,14} Entretanto, a persistência da infestação em países vizinhos e o relaxamento de sua vigilância no Brasil permitiram a recolonização por esse vetor^{10,14} e a colonização por *Ae. albopictus* nas décadas seguintes.^{15,16} O sucesso do Programa Nacional de Controle da Dengue (PNCD) tem sido limitado,¹⁷ não só pelas restrições orçamentárias aplicadas à Saúde Pública mas também pela crise climática,¹⁸ urbanização e intensificação do transporte internacional, que favorecem a expansão geográfica das espécies de *Aedes*.^{9,10,19}

O sistema de classificação da infestação, definido pelo PNCD e adotado pelos municípios brasileiros, considera cada município como ‘infestado’ (índice de infestação predial >0%) ou ‘não infestado’.¹⁶ Ao adotar esse sistema, a vigilância epidemiológica do estado do Rio Grande do Sul tem registrado um aumento do número de municípios oficialmente infestados por *Ae. aegypti*, de 58 em 2008 para 391 em 2020,²⁰ associado à identificação de transmissão autóctone de arboviroses.^{20,21} Nesse sistema de classificação, há chance de os gestores da Saúde subestimarem o número de municípios infestados, devido a imperfeição na detecção das infestações,^{1,2} diminuição do esforço de vigilância durante o inverno e ocorrência de invernos cada vez mais amenos, incapazes de eliminar as populações de *Aedes*.⁶

Em lugar de propor mais ajustes à classificação binária, propõe-se uma classificação probabilística, baseada na estimativa de probabilidade de infestação. Esta estimativa é realizada sobre um modelo estatístico das observações em campo, que incorpora diversas fontes de variação na infestação, como os erros de detecção, o efeito do ambiente local e a difusão espacial da infestação.

O objetivo deste estudo foi comparar o mapeamento oficial com um mapeamento probabilístico da infestação por *Aedes* spp. nos municípios do Rio Grande do Sul, Brasil.

Métodos

Este estudo ecológico analisou dados de 473 municípios do Rio Grande do Sul (RS), coletados entre 2016 e 2017. O RS é o estado mais meridional do Brasil e o quinto mais populoso, com aproximadamente 11 milhões de habitantes em 2014.²² Sua maior densidade populacional encontra-se na região metropolitana de Porto Alegre, >430 hab. por km² em 2013.²³ No mesmo ano de 2013, a região do RS com maior desenvolvimento socioeconômico era o nordeste do estado, enquanto a centro-sul era a menos desenvolvida.²³ O clima do RS é temperado, sem um período seco característico, com temperatura média anual de 10 a 15°C, mínimas próximas a 0°C no inverno e máximas próximas a 40°C no verão.²⁴

Analisou-se as seguintes variáveis na escala de município:

- a) Observações em campo (detecção; não detecção) de *Ae. aegypti* e *Ae. albopictus*
- b) Classificação oficial binária da infestação
- c) Variáveis ambientais, espaciais e epidemiológicas
 - Temperatura²⁵
 - Precipitação²⁵
 - Cobertura florestal²⁶
 - Densidade populacional humana²²
 - Vizinhança espacial, baseada no mapa digital do RS, elaborado pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler
 - Notificações de casos autóctones de dengue, Zika e chikungunya no Sistema de Informação de Agravos de Notificação (Sinan), referentes ao período de estudo

Analisou-se dados das observações em campo gerados pelas metodologias de vigilância entomológica de levantamento de índices amostrais (LIA) e levantamento de índice rápido para *Ae. aegypti* (LIRAA), implementadas nos municípios do RS entre janeiro de 2016 e dezembro de 2017. No LIA e no LIRAA, um agente de endemias, sempre que encontra um criadouro de mosquitos, deve coletar as larvas: até dez indivíduos por recipiente de coleta (tubito).¹⁶ Esses tubitos são enviados a laboratórios da rede pública

para a identificação taxonômica, cujos resultados são compilados em boletins epidemiológicos a serem publicados pelo Centro Estadual de Vigilância em Saúde (CEVS).²¹

A classificação oficial binária da infestação por *Ae. aegypti* nos municípios do RS foi obtida dos boletins epidemiológicos semanais do CEVS, correspondentes ao período selecionado pelo estudo.²¹ Essa classificação não existe para o *Ae. albopictus*. As normas de classificação binária assentam-se na ‘delimitação de foco’, uma busca por criadouros em um raio de 300 metros à volta de um sítio inicial de detecção de *Ae. aegypti*. A Nota Técnica (NT) 01/2012, vigente no RS até o final de 2017,²⁷ estabelecia que um município é ‘infestado’ quando uma delimitação de foco retornava ao menos duas novas detecções de *Ae. aegypti*. Em janeiro de 2018, a NT 01/2018 modificou esse critério para apenas uma nova detecção.²⁸ Também passaram a ser classificados como ‘infestado’ municípios com notificação de arboviroses autóctones.

O modelo estatístico de probabilidade de infestação aplicado aos dados das observações em campo é um modelo hierárquico de dinâmica da ocupação de sítios com difusão espacial.^{4,5} Por separarem a análise em dois níveis hierárquicos – (i) o processo amostral, que influencia na detecção da espécie; e (ii) o processo biológico, que influencia em sua distribuição espaço-temporal –, esses modelos quantificam a incerteza sobre a infestação por eventuais falhas de observação, possivelmente frequentes, dada a variação de esforço amostral entre sítios (municípios). O modelo foi aplicado aos dados de *Ae. aegypti* e *Ae. albopictus* para estimar a probabilidade de infestação nos 496 municípios, ao longo das 104 semanas incluídas no período de estudo, considerando-se o município como unidade espacial, e a semana epidemiológica (ou ‘semana’) como unidade temporal. Cada semana contém até sete dias de amostragem; e cada dia, um número de tubitos a servir de medida de esforço amostral, devido à indisponibilidade de dados do número de imóveis vistoriados.

No modelo especificado, quando um agente de endemias coleta n_{ijt} tubitos em um município i , no dia j da semana t , a probabilidade P_{ijt} de encontrar uma das espécies de *Aedes* nessa coleta é calculada pela seguinte fórmula,

$$P_{ijt} = 1 - (1 - p)^{\sqrt{n_{ijt}}}$$

onde p é a probabilidade de detectar *Aedes* spp. em uma unidade de esforço, medido na escala de $\sqrt{n_{ijt}}$. Como $(1 - p)$ representa a probabilidade de não detectar o vetor em uma unidade de esforço, P_{ijt} representa a probabilidade de o detectar em pelo menos uma unidade. Sempre que $p < 1$, pode-se encontrar falsos zeros nos dados.^{2,4}

Além de considerar falhas de detecção, o modelo relaciona a dinâmica na ocupação de sítios com as condições ambientais de cada município.⁴ A probabilidade de infestação de *Aedes* spp. ψ_{it} do município i na semana t depende dos processos de colonização e extinção local. Um município i não infestado no tempo t tem probabilidade γ_{it} de ser colonizado no tempo $t+1$. Já um município infestado no tempo t pode sofrer uma extinção local e ficar desinfestado no tempo $t+1$, com probabilidade ε_{it} . A análise incorpora variação de γ_{it} e ε_{it} entre municípios e semanas, utilizando-se de modelos lineares generalizados (GLM)^{4,5} que consideram efeitos das variáveis ambientais mencionadas. Esses efeitos caracterizam a tolerância das espécies de mosquito às condições abióticas,^{6,8,9,18,19} incluindo a urbanização.^{6,8} Por fim, utiliza-se a vizinhança espacial entre municípios como base para a estimativa da difusão espacial, indicativa de que um município não infestado, embora com muitos vizinhos infestados na semana t , apresentará alta probabilidade de infestação na semana $t+1$.⁵

Para o estudo, o modelo foi especificado em linguagem BUGS (*Bayesian Inference Using Gibbs Sampling*) e ajustado aos dados em contexto Bayesiano por um algoritmo de Markov Chain Monte-Carlo (MCMC), que permite inferir a distribuição estatística dos parâmetros estimados. O MCMC correu em duas cadeias de 50 mil iterações, fase adaptativa de 20 mil iterações, fase de inicialização de 40 mil iterações, e retirada de amostras a cada 20 iterações. Estas especificações facultaram 1000 amostras da distribuição *a posteriori* dos parâmetros do modelo, permitindo a construção de uma matriz de infestação por município e semana (ψ_{it}) que serviu de base para a construção de mapas. Somando-se os valores de ψ_{it} para todos o município i em uma semana t , foi possível obter um número esperado de municípios infestados para essa semana.

Comparação entre a infestação oficial e a probabilística

Para classificar oficialmente um município como infestado, o CEVS adota a premissa de que agentes de endemias detectam criadouros com mosquitos em todos os municípios realmente infestados (i.e., $p=1$). A veracidade dessa premissa pode ser

avaliada pela comparação entre a classificação oficial e a probabilidade de infestação estimada pelo modelo.

A comparação foi feita sob duas perspectivas: estática e dinâmica. Na comparação estática, para cada município, ao final do período de estudo, subtraiu-se da classificação oficial binária ('infestado'=1; 'não infestado'=0) o valor máximo de probabilidade de infestação que um município alcançou durante esse período. Resultados próximos a -1 destacam municípios classificados oficialmente como 'não infestado' e que apresentaram alta probabilidade de infestação estimada. Na comparação dinâmica, subtraiu-se do número de semanas durante as quais o município ficou oficialmente classificado como 'infestado', o número esperado de semanas com infestação de acordo com o modelo; este último número obtém-se pela soma dos valores de ψ_{it} para o município i ao longo de todo o período de análise. Resultados próximos a -104 aproximam-se da disparidade máxima entre uma classificação oficial de 'não infestado' e uma previsão estatística de muito tempo de infestação (o estudo abrange 104 semanas). Essas análises foram realizadas somente para o *Ae. aegypti*, devido à falta de uma classificação binária para o *Ae. albopictus*.

Para converter uma probabilidade de infestação em uma classificação binária, faz-se necessário definir um limiar de probabilidade acima do qual um município é considerado 'infestado'. Nesse contexto, examinou-se qual o limiar de probabilidade necessário para obter uma proporção de municípios infestados igual à proporção da classificação binária de cada NT. Nos extremos, um limiar de 0 resulta em todos os municípios infestados, enquanto um limiar de 1 resulta em nenhum município infestado. Essa análise permitiu avaliar os níveis de exigência da NT 01/2012 e da NT 01/2018 para considerar um município infestado. Aplicou-se o mesmo raciocínio ao subconjunto de municípios com notificação de transmissão autóctone de arboviroses, que necessariamente deveriam estar infestados e, portanto, deveriam apresentar limiares mais baixos. Como nas comparações anteriores, a busca de limiares foi aplicada apenas aos dados do *Ae. aegypti*. Todas as análises foram realizadas no ambiente de programação R.²⁹

Resultados

Dados de 473 municípios foram analisados, para estimar a infestação dos 496 municípios do RS, com média (\pm desvio-padrão) de $30,30 \pm 25,44$ semanas de amostragem para todos os municípios. No total, foram coletados 187.245 tubitos ao longo de 31.894 ocasiões amostrais; destas, 10.648 tiveram detecção de *Ae. aegypti* (5,6%) e 8.414 de *Ae. albopictus* (4,5%). O número estimado de municípios infestados, para ambas espécies de *Aedes*, sempre superou o número de municípios com detecção das espécies (Figura 1A). Essa diferença foi maior ou igual a 100 municípios, para todas as semanas, com valor médio de 145 para *Ae. aegypti* e 174 para *Ae. albopictus*. Quando um município estava infestado, a probabilidade média de detecção em um dia de amostragem foi maior para *Ae. aegypti* ($0,420 \pm 0,004$) do que para *Ae. albopictus* ($0,360 \pm 0,004$), e atingiu valores muito próximos a 1 para ambas espécies, com um número de tubitos maior que 75 (Figura Suplementar 1).

O número de municípios infestados variou no tempo, de forma semelhante para ambas espécies. As semanas com maior número esperado de municípios infestados foram a 16 (abril) de 2017 para *Ae. aegypti*, e a 15 (abril) de 2016 para *Ae. albopictus* (Figura 1A). Em contraste, as semanas com menor número esperado de municípios infestados foram a 39 (setembro) de 2016 para *Ae. aegypti*, e a 41 (outubro) de 2016 para *Ae. albopictus* (Figura 1A). O número esperado de municípios infestados durante as semanas de infestação mínima foi de 138 para *Ae. aegypti* e de 189 para *Ae. albopictus*. O número esperado de municípios infestados nas semanas de infestação máxima foi sempre próximo a 50% dos municípios, com uma maior diferença entre espécies em 2016 (228 municípios para *Ae. Aegypti*, 267 para *Ae. albopictus*) do que em 2017 (248 municípios para *Ae. Aegypti*, 262 para *Ae. albopictus*) (Figura 1A).

Embora a variação temporal da infestação fosse similar entre espécies, sua distribuição espacial revelou-se distinta (Figura 2). Os municípios com um grande número esperado de semanas com infestação por *Ae. aegypti* não foram os mesmos que tiveram um grande número esperado de semanas com infestação por *Ae. albopictus* (Figura 2D). A comparação da observação (Figuras 2A e 2C) com a estimativa (Figuras 2B e 2D)

mostra que o número de semanas com observação de infestação foi menor que o número estimado de semanas com infestação, para ambas espécies.

A comparação da incerteza associada ao número de municípios (variação no tempo) (Figura 1B) com a incerteza associada ao número de semanas (variação no espaço entre municípios) (Figura 3) revelou maior incerteza espacial do que temporal, para ambas espécies. O desvio-padrão do número de municípios infestados em cada semana variou pouco, ao longo do tempo, tomando valores entre 6 e 12 municípios, com aumento durante o inverno e, em consequência da estrutura do modelo, nos extremos do período de estudo (Figura 1B). Já o desvio-padrão do número de semanas com infestação para cada município foi mais alto na borda das manchas de infestação. Para o *Ae. aegypti*, os valores altos (≥ 15 semanas) apareceram nas regiões norte e centro do RS, na margem leste da Lagoa dos Patos e no extremo sul do estado (Figura 3A). Para o *Ae. albopictus*, os valores altos apareceram nas regiões norte, nordeste, planalto e litoral norte do estado (Figura 3B).

A comparação estática dos valores de infestação oficial e probabilística revelou discordância, particularmente alta em municípios das regiões leste, nordeste, centro e sul do RS (Figura 4A). Na comparação dinâmica de infestação, observou-se um padrão diferente: os municípios das regiões noroeste e oeste apareceram como oficialmente infestados durante mais semanas do que o esperado pelas estimativas de infestação (Figura 4B). Na metade sudeste do estado gaúcho, uma grande parte dos municípios apresentou uma discordância de -20 na comparação dinâmica, indicando que o número estimado excedeu em 20 o número oficial de semanas com infestação. Em contrapartida, alguns municípios oficialmente infestados apresentaram um número esperado de semanas com infestação muito baixo (Figura 4B).

A busca por limiares de probabilidade revelou que o limiar correspondente à proporção de municípios infestados, segundo a classificação oficial pela NT 01/2012, foi de aproximadamente 0,919, e pela NT 01/2018, de 0,741 (Figura 5A). Detendo-se apenas nos 49 municípios com notificação de casos autóctones de arboviroses em 2016 (Figura 5B), o limiar correspondente à NT 01/2012 foi de 0,620, o que excluía municípios que apresentaram casos de arboviroses, classificação oficial como 'não infestado' e probabilidade máxima de infestação inferior a 0,620. Ainda dentro do conjunto de municípios com notificação de doença, o limiar correspondente à NT 01/2018 foi de

0,241 (Figura 5B), com 100% dos municípios com casos autóctones de arboviroses sendo classificados oficialmente como ‘infestado’.

Discussão

O mapeamento oficial da infestação por *Ae. aegypti* concordou com o mapeamento probabilístico em municípios das regiões noroeste e oeste do Rio Grande do Sul. Entretanto, o mapeamento oficial discordou consideravelmente do probabilístico em municípios das regiões leste, nordeste, centro e sul do estado, revelando municípios oficialmente não infestados que apresentavam notificação de arboviroses e alta probabilidade de infestação. As estimativas também mostraram que o *Ae. aegypti* e o *Ae. albopictus* tiveram distribuições espaciais distintas, e que as infestações por ambas espécies persistiram ao longo do estudo em mais de um quarto dos municípios do RS, chegando a mais da metade no final do verão.

O número de municípios infestados sempre foi maior nas classificações probabilísticas, comparadas à classificação binária. Os programas de vigilância entomológica, que embasam a classificação binária,¹⁶ apresentam uma limitação incontornável: a imperfeição no processo de detecção dos criadouros com mosquitos.^{1,2} Como o modelo corrige essa imperfeição e incorpora difusão espacial da infestação, ele reduz a frequência de falsos zeros.^{1,2,5} Três recomendações práticas à vigilância emergem do conhecimento dos vieses na amostragem dos mosquitos, e são extensivas a outros estados brasileiros. A primeira recomendação é a de que o esforço de vigilância seja regular, no tempo e no espaço, em regiões com clima variante, maior heterogeneidade na distribuição dos mosquitos e facilidade de difusão espacial da infestação e de arboviroses.^{11,12,20} A segunda recomendação é intensificar a vigilância nos municípios das bordas de distribuição geográfica dos mosquitos, onde a incerteza sobre a infestação é alta, resultante da heterogeneidade ambiental.⁶ E a terceira recomendação, para que o sistema de armazenamento dos dados da vigilância entomológica integre, em uma mesma plataforma, os dados do número de imóveis vistoriados, do número de tubitos

coletados e das detecções dos criadouros. A falta dessa integração impediu estes pesquisadores de identificar os municípios e as semanas epidemiológicas onde a infestação não foi detectada, por falta de vigilância e de coleta de tubitos.

A comparação do mapeamento oficial com o probabilístico facilita a análise crítica da vigilância de *Aedes* e ajuda a identificar lacunas de conhecimento; e mapeia municípios críticos, para a alocação de recursos na vigilância e controle vetorial. Municípios de grande parte das regiões leste, nordeste, centro e sul do RS, tidos oficialmente como não infestados, alcançaram alta probabilidade de infestação por *Ae. aegypti* ao longo das 104 semanas epidemiológicas analisadas. As análises mostraram que a classificação binária, segundo a NT 01/2012, era rigorosa apenas o suficiente para classificar como infestados os municípios das regiões noroeste e oeste, onde os gestores da Saúde estão cientes da situação crítica da infestação e transmissão de arboviroses.^{11,12,20} A NT 01/2012 era especialmente leniente ao classificar como não infestados um grande número dos municípios de outras regiões onde a infestação varia temporalmente. O limiar correspondente à NT 01/2018 foi cerca de 40% menor que o da NT 01/2012, resultando na classificação como 'infestado' dos municípios de Barão, Barra do Ribeiro e Portão, que apresentaram baixa probabilidade de infestação por *Ae. aegypti* e casos autóctones de arboviroses entre 2016 e 2017. Percebe-se que o uso da notificação de arboviroses como critério de infestação do município aumentou consideravelmente o rigor da classificação oficial. Esse critério se embasa em um fator biológico fundamental, conquanto negligenciado até a NT 01/2018: a transmissão autóctone de arbovirose não acontece sem a presença de seus vetores.¹⁹

Os mapas do número esperado de semanas com infestação por *Ae. aegypti* e *Ae. albopictus* apresentaram diferenças. O *Aedes aegypti* é sensível a temperaturas baixas e habita, frequentemente, o entorno e interior de residências humanas, onde encontra alimento, locais de oviposição protegidos e estabilidade térmica.^{6,18,19} Os resultados apresentados revelaram mais tempo de infestação por *Ae. aegypti* em regiões com densidade populacional relativamente alta e temperatura relativamente estável, como a região metropolitana de Porto Alegre, o noroeste e o oeste do estado.^{20,23} Estas são, também, regiões com alta circulação de pessoas e produtos, assim como alta disponibilidade de criadouros artificiais, decorrentes de um saneamento básico deficiente.^{11,23} O *Aedes albopictus* tende a habitar regiões mais florestadas e com

temperaturas baixas,¹⁸ frequentemente em bordas florestais de áreas periurbanas e parques, ovipositando em ocos de árvores ou bromélias e se alimentando de sangue humano e de animais silvestres.⁸ Essa preferência de *habitat* foi corroborada pela observação de maior tempo de infestação por *Ae. albopictus* em regiões mais frias, densamente povoadas e com maior cobertura florestal, como o Alto Uruguai e serras do centro e nordeste do estado.²³ As diferenças na distribuição mapeada das espécies sugerem que, a depender da região, as arboviroses podem ser transmitidas por vetores diferentes. Os resultados também reforçaram a importância de considerar o papel do *Ae. albopictus* como vetor de arboviroses,⁸ adequando-se a ele o controle vetorial nos municípios infestados predominantemente por essa espécie.

O *Aedes aegypti* e o *Ae. albopictus* persistiram ao longo do estudo, em mais de um quarto dos municípios do estado. A persistência da infestação por *Aedes* spp. ao longo do ano, com consequente transmissão estável de arbovírus, constitui uma ameaça à Saúde Pública do Rio Grande do Sul, no horizonte das próximas décadas, para quando são esperados menos eventos de geada, aumento da temperatura média anual e maior frequência de extremos de temperatura e precipitação,³⁰ condições favoráveis ao desenvolvimento, reprodução e oviposição contínua dos mosquitos.^{6,7,18} Finalmente, cabe acrescentar que o trânsito de pessoas e produtos entre regiões do Brasil facilita ainda mais a difusão espacial da infestação, e agrava o cenário futuro de transmissão de arboviroses.^{10,14}

A comparação do mapeamento oficial com o mapeamento probabilístico revelou que os critérios de classificação oficial identificavam corretamente os municípios infestados criticamente, e com histórico de registro de arboviroses, porém falhavam em identificar a infestação em municípios com possíveis falsos zeros e onde a infestação varia temporalmente.

Contribuição dos autores

Luza AL, Gualdi C, Diefenbach LMLAG, Schüller-Faccini L e Ferraz G contribuíram com a concepção e delineamento do estudo. Luza AL implementou o modelo estatístico, realizou as análises e, juntamente com Ferraz G, interpretou os resultados e escreveu a primeira versão do manuscrito. Gualdi C, Diefenbach LMLAG e Schüller-Faccini L

contribuíram criticamente, para a revisão das versões preliminares e da versão final do manuscrito. Todos os autores aprovaram a versão final do manuscrito e são responsáveis por todos os aspectos do trabalho, incluindo a garantia de sua precisão e integridade.

Conflitos de interesses

Não há qualquer conflito de interesse dos autores em relação a este manuscrito.

Agradecimentos

A Guilherme Barradas Morés, pelas sugestões à elaboração do modelo estatístico.

Referências

1. Mores GB, Schuler-Faccini L, Hasenack H, Fetzer LO, Souza GD, Ferraz G. Site occupancy by *Aedes aegypti* in a subtropical city is most sensitive to control during autumn and winter months. *Am J Trop Med Hyg* [Internet]. 2020 Jul [cited 2020 Jun 07];103(1):445-54. Available from: <https://doi.org/10.4269/ajtmh.19-0366>
2. Padilla-Torres SD, Ferraz G, Luz SLB, Zamora-Perea E, Abad-Franch F. Modeling dengue vector dynamics under imperfect detection: three years of site-occupancy by *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* in urban Amazonia. *PLoS One* [Internet]. 2013 Mar [cited 2020 Mar 18];8(3):e58420. Available from: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058420>
3. Veran S, Simpson SJ, Sword GA, Deveson E, Piry S, Hines JE, et al. Modeling spatiotemporal dynamics of outbreaking species: influence of environment and migration in a locust. *Ecology* [Internet]. 2015 Mar [cited 2020 Mar 18];96(3):737–48. Available from: <https://doi.org/10.1890/14-0183.1>
4. Mackenzie DE, Nichols JD, Hines JE, Knutson MG, Franklin AB. Estimating site occupancy, colonization, and local extinction when a species is detected imperfectly. *Ecology* [Internet]. 2003 Aug [cited 2020 Mar 18];84(8):2200–7. Available from: <https://doi.org/10.1890/02-3090>
5. Bled F, Royle JA, Cam E. Hierarchical modeling of an invasive spread: the Eurasian Collared-Dove *Streptopelia decaocto* in the United States. *Ecol Appl* [Internet]. 2011 Jan [cited 2020 Mar 18];21(1):290–302. Available from: <https://doi.org/10.1890/09-1877.1>
6. Eisen L, Monaghan AJ, Lozano-Fuentes S, Steinhoff DF, Hayden MH, Bieringer PE. The impact of temperature on the bionomics of *Aedes (Stegomyia) aegypti*,

- with special reference to the cool geographic range margins. *J Med Entomol* [Internet]. 2014 May [cited 2020 Mar 18];51(3):496–516. Available from: <https://doi.org/10.1603/me13214>
7. Katzelnick LC, Coloma J, Harris E. Dengue: knowledge gaps, unmet needs, and research priorities. *Lancet Infect Dis* [Internet]. 2017 Mar [cited 2020 Mar 18];17(3):e88–100. Available from: [https://doi.org/10.1016/s1473-3099\(16\)30473-x](https://doi.org/10.1016/s1473-3099(16)30473-x)
 8. Pereira-dos-Santos T, Roiz D, Lourenço-de-Lima R, Paupy, C. A systematic review: is *Aedes albopictus* an efficient bridge vector for zoonotic arboviruses? *Pathogens* [Internet]. 2020 Apr [cited 2020 Jul 30];9(4):226. Available from: <https://doi.org/10.3390/pathogens9040266>
 9. Capinha C, Rocha J, Sousa CA. Macroclimate determines the global range limit of *Aedes aegypti*. *EcoHealth* [Internet]. 2014 Sep [cited 2020 Dec 16];11(3):420–8. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10393-014-0918-y>
 10. Silva AG, Cunha ICL, Santos WS, Luz SLB, Ribolla PEM, Abad-Franch F. Gene flow networks among american *Aedes aegypti* populations. *Evol Appl* [Internet]. 2012 Nov [cited 2020 Mar 18];5(4):664–76. Available from: <https://dx.doi.org/10.1111%2Fj.1752-4571.2012.00244.x>
 11. Gregianini TS, Tumioto Giannini GL, Favreto C, Plentz LC, Ikuta N, et al. Dengue in Rio Grande do Sul, Brazil: 2014 to 2016. *Rev Med Virol* [Internet]. 2018 Jan [cited 2020 Mar 18];28(1):e1960. Available from: <https://doi.org/10.1002/rmv.1960>
 12. Gregianini TS, Ranieri T, Favreto C, Nunes ZMA, Tumioto Giannini GL, et al. Emerging arboviruses in Rio Grande do Sul, Brazil: Chikungunya and Zika outbreaks, 2014–2016. *Rev Med Virol* [Internet]. 2017 Nov [cited 2020 Mar 18];27(6):e1943. Available from: <https://doi.org/10.1002/rmv.1943>
 13. Zara ALSA, Santos SM, Fernandes-Oliveira ES, Carvalho RG, Coelho GE. Estratégias de controle do *Aedes aegypti*: uma revisão. *Epidemiol Serv Saúde* [Internet]. 2016 abr-jun [citado 2020 mar 18];25(2):391-404. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5123/S1679-49742016000200017>
 14. Kotsakiozi P, Gloria-Soria A, Caccone A, Evans B, Schama R, Martins AJ, et al. Tracking the return of *Aedes aegypti* to Brazil, the major vector of the dengue, chikungunya and Zika viruses. *PLoS Negl Trop Dis* [Internet]. 2017 Jul [cited 2020 Mar 18];11(7):e0005653. Available from: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005653>
 15. Carvalho RG, Lourenço-de-Oliveira R, Braga IA. Updating the geographical distribution and frequency of *Aedes albopictus* in Brazil with remarks regarding its range in the Americas. *Mem Inst Oswaldo Cruz* [Internet]. 2014 Sep [cited 2020 Mar 18];109(6):787–96. Available from: <https://doi.org/10.1590/0074-0276140304>

16. Ministério da Saúde (BR). Fundação Nacional de Saúde. Programa nacional de controle da dengue [Internet]. Brasília: Fundação Nacional de Saúde; 2002 [citado 2020 mar 18]. 34 p. Disponível em: http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/pncd_2002.pdf
17. Pessanha JEM, Caiaffa WT, César CC, Proietti FA. Avaliação do plano nacional de controle da dengue. Cad Saúde Pública [Internet]. 2009 jul [citado 2020 mar 18];25(7):1637–41. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2009000700024>
18. Reinhold JM, Lazzari CR, Lahondère C. Effects of the environmental temperature on *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* mosquitoes: a review. Insects [Internet]. 2018 Nov [cited 2020 Mar 18];9(4):E158. Available from: <https://doi.org/10.3390/insects9040158>
19. Kraemer MUG, Sinka ME, Duda KA, Mylne AQ, Shearer FM, Barker CM, et al. The global distribution of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus*. eLife [Internet]. 2015 Jun [cited 2020 Mar 18];4:e08347. Available from: <https://doi.org/10.7554/elife.08347>
20. Centro Estadual de Vigilância em Saúde. Informativo epidemiológico de arboviroses: semana epidemiológica 35/2020 (23/08 a 29/08) [Internet]. Porto Alegre: Centro Estadual de Vigilância em Saúde; 2020 [citado 2020 out 03]. 13 p. Disponível em: <https://www.cevs.rs.gov.br/dengue-chikungunya-Zika-virus>
21. Tumiotto GL, Gregianini TS, Dambros BP, Cestari BC, Nunes ZMA, Veiga ABG, et al. Laboratory surveillance of dengue in Rio Grande do Sul, Brazil, from 2007 to 2013. PLoS One [Internet]. 2014 Aug [cited 2020 Mar 18];9(8):e104394. Available from: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104394>
22. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Ministério da Economia. Estimativas da população [Internet]. Rio de Janeiro: IBGE; 2017 [citado 2020 mar 18]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=16985&t=resultados>
23. Pessoa ML. Atlas da Fundação Estadual de Estatística [Internet]. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul; Fundação Estadual de Estatística; 2017 [citado 2020 mar 18]. Disponível em: <http://atlas.fee.tche.br/>
24. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Mapa de clima do Brasil 1:5 000 000 [internet]. Rio de Janeiro: IBGE; 2002 [citado 2020 jun 06]. Disponível em: http://geofpt.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf
25. Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (BR). Ministério da Agricultura, Agropecuária e Abastecimento. BDMEP - Banco de dados meteorológicos para

- ensino e pesquisa [Internet]. Brasília: INMET; 2019 [citado 2020 mar 18]. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>
26. Ribeiro MC, Metzger JP, Martensen AC, Ponzoni FJ, Hirota MM. The Brazilian atlantic forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biol Conserv* [Internet]. 2009 Jun [cited 2020 Sep 03];142(6):1141-53. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021>
 27. Rio Grande do Sul. Centro Estadual de Vigilância em Saúde. Nota técnica nº 01, de 29 de junho de 2012. Regulamenta os critérios para declarar município infestado por *Aedes aegypti*. Porto Alegre (RS); 2012.
 28. Rio Grande do Sul. Centro Estadual de Vigilância em Saúde. Nota técnica nº 01, de 19 de janeiro de 2018. Regulamenta os critérios para declarar município infestado ou não infestado por *Aedes aegypti*. Porto Alegre (RS); 2018.
 29. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Versão 3.6.1 [Internet]. [Vienna]: R Foundation for Statistical Computing; 2019. Available from: <https://www.R-project.org/>
 30. Marengo J. O futuro clima do Brasil. *Rev USP* [Internet]. 2014 [citado 2020 mar 18];103:25–32. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i103p25-32>

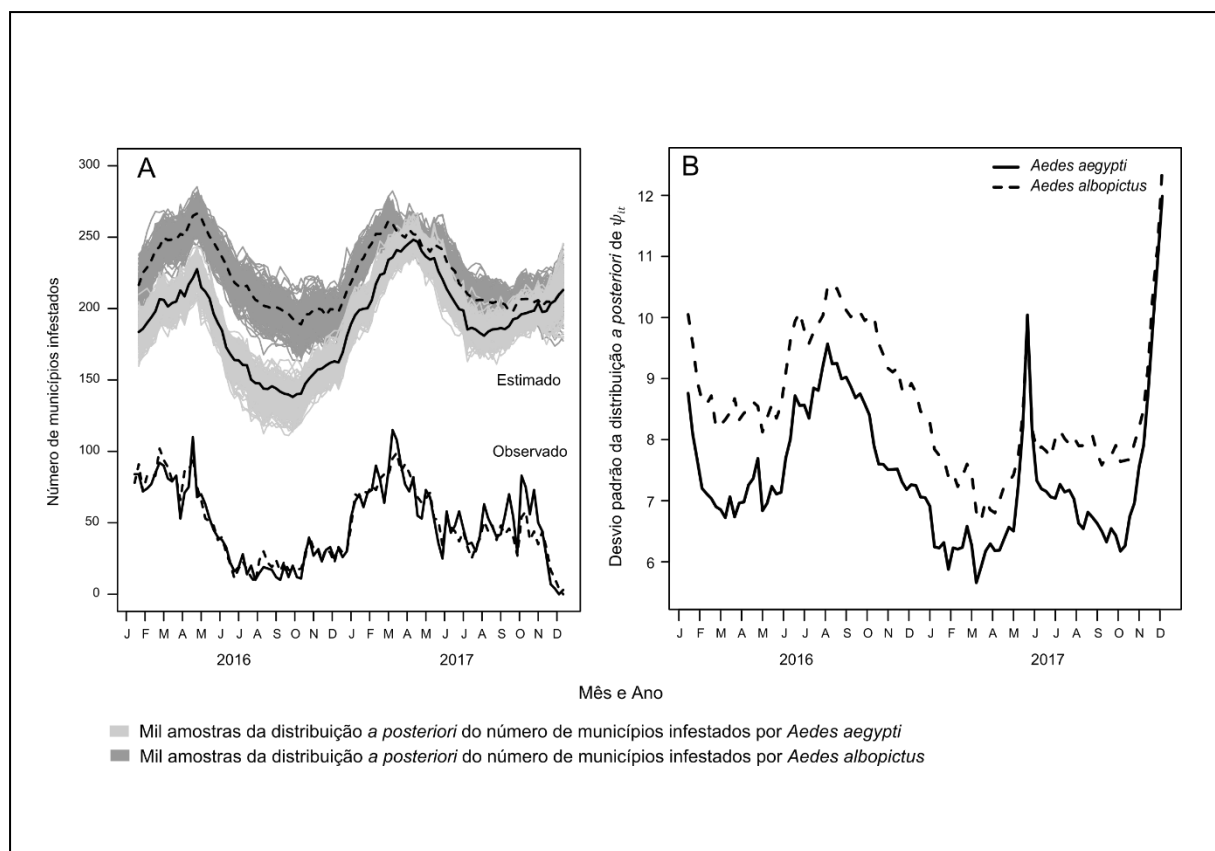


Figura 1 – Variação temporal do número de municípios infestados (A) e da incerteza sobre a infestação (B) por *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus*, Rio Grande do Sul, 2016-2017

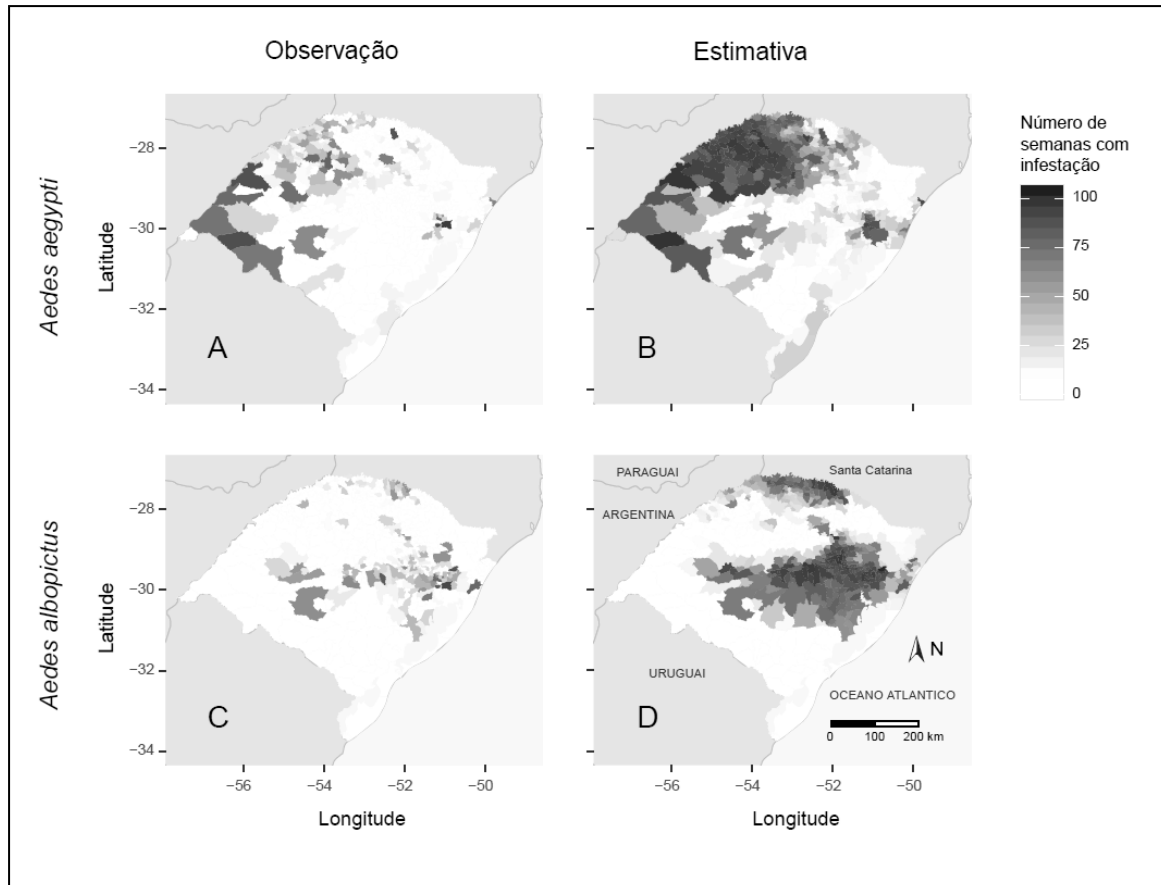


Figura 2 – Distribuição geográfica de *Aedes aegypti* (A e B) e *Aedes albopictus* (C e D), baseada em número de semanas com pelo menos uma detecção da espécie (A e C) e com presença da espécie de acordo com o modelo (B e D), Rio Grande do Sul, 2016-2017

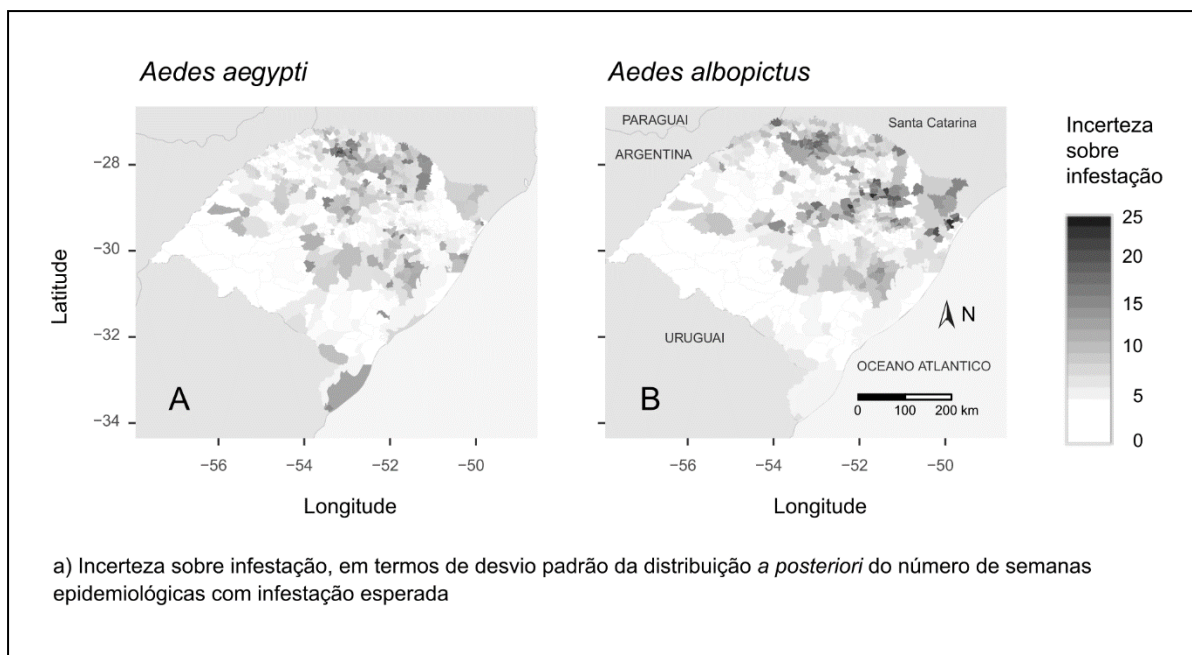


Figura 3 – Incerteza sobre a infestação por *Aedes aegypti* (A) e *Aedes albopictus* (B) no Rio Grande do Sul, 2016-2017

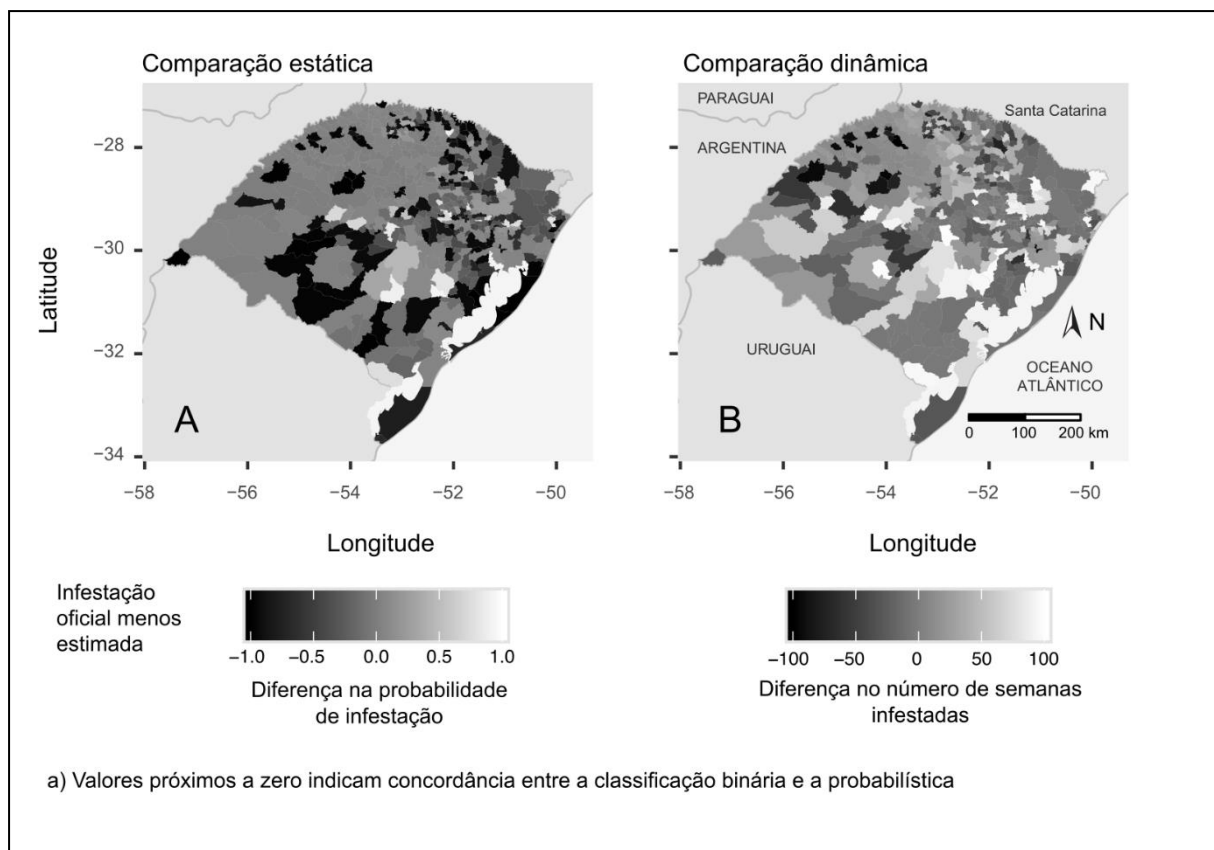


Figura 4 – Comparação entre a classificação binária e a classificação probabilística de infestação por *Aedes* spp para cada município do Rio Grande do Sul, 2016-2017

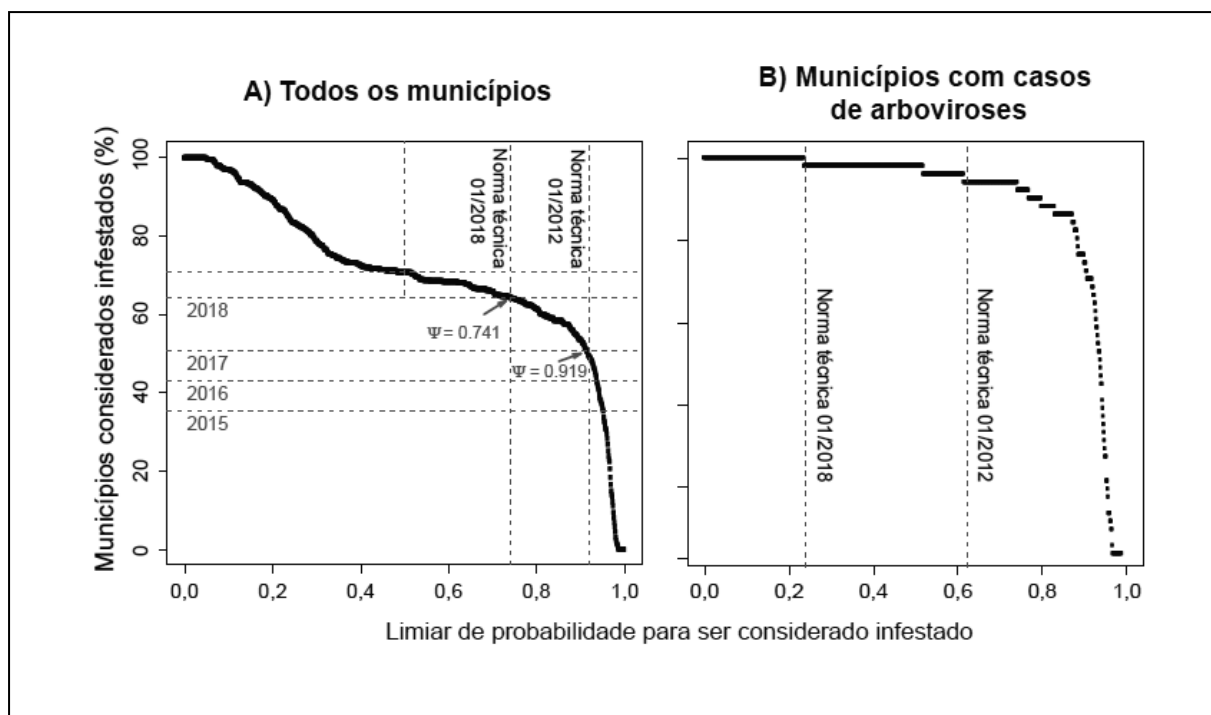


Figura 5 – Relação entre a proporção de municípios oficialmente infestados por *Aedes aegypti* e os limiares de probabilidade para classificação binária de infestação por *Aedes* spp, Rio Grande do Sul, 2016-2017

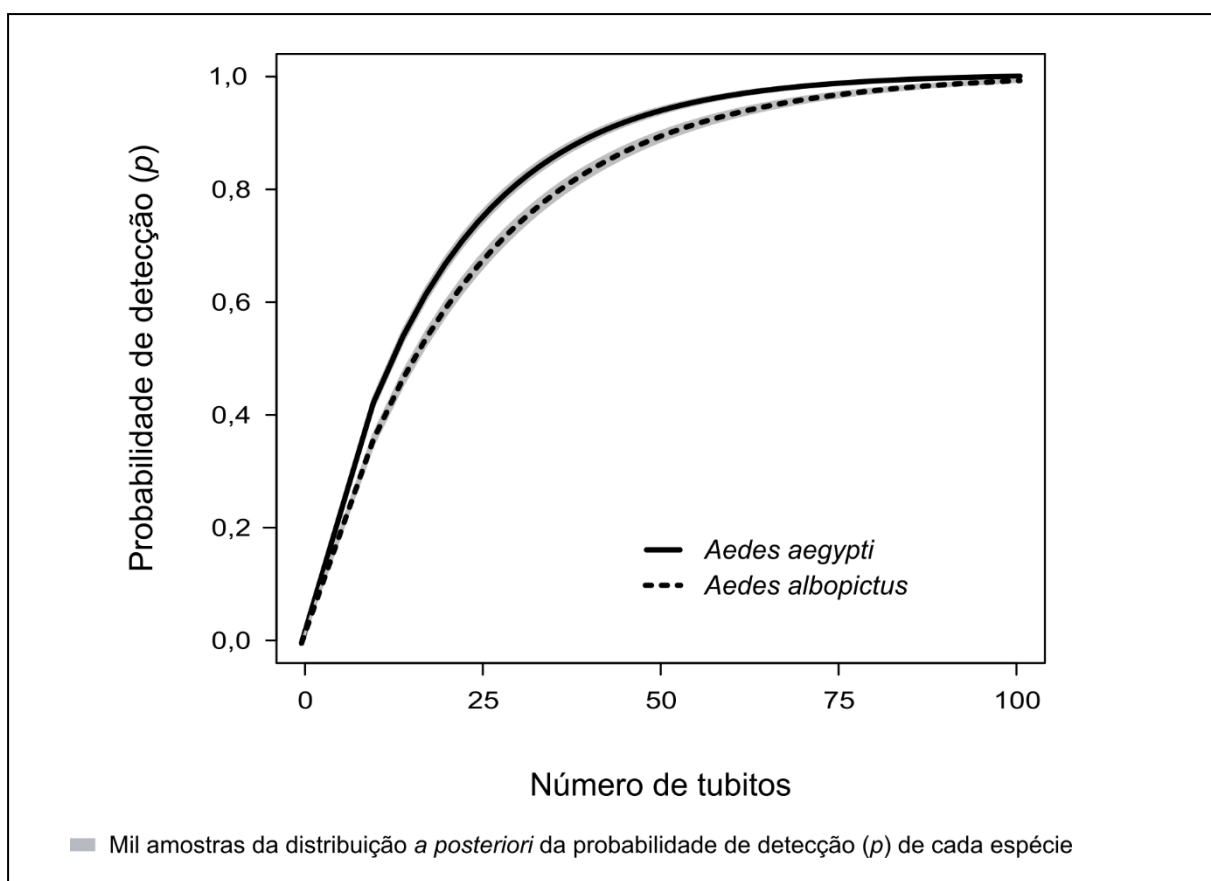


Figura Suplementar 1 – Relação entre o número de tubitos coletados por dia de monitoramento e a probabilidade de detecção de *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus* nos municípios do Rio Grande do Sul, 2016-2017