

## **Aplicação da Modelagem Espacial Bayesiana utilizando os Métodos INLA e SPDE nas Ocorrências de Leptospirose em Áreas Alagadas do Rio Grande do Sul**

Janaína Freitas da Fonseca<sup>1</sup>

Raquel Fontoura Nicolette<sup>2</sup>

**Resumo:** A leptospirose é uma doença infecciosa comumente associada a áreas alagadas, sendo um problema de saúde pública significativo no Rio Grande do Sul, ultimamente. Devido à sua associação com eventos climáticos e ambientais, como chuvas intensas e alagamentos ocorridos frequentemente, logo, a análise espacial bayesiana dessa doença requer abordagens geoestatísticas avançadas que possam capturar a complexidade das interações espaço-temporais. Destacamos que, o trabalho tem o objetivo de oferecer uma análise abrangente e fundamentada sobre a *Aplicação da Modelagem Espacial Bayesiana utilizando os Métodos INLA e SPDE nas Ocorrências de Leptospirose em Áreas Alagadas do Rio Grande do Sul* e fornecer uma visão atualizada da literatura existente e apontar potenciais áreas de crescimento para futuras pesquisas.

**Palavras-chave:** Modelagem Espacial Bayesiana, INLA, SPDE, Leptospirose, Áreas Alagadas, Rio Grande do Sul.

**Abstract:** Leptospirosis is an infectious disease commonly associated with flooded areas, and it has become a significant public health issue in Rio Grande do Sul recently. Due to its association with climatic and environmental events, such as frequent heavy rains and floods, the Bayesian spatial analysis of this disease requires advanced geostatistical approaches that can capture the complexity of spatiotemporal interactions. This study aims to provide a comprehensive and well-founded analysis of the Application of Bayesian Spatial Modeling using the INLA and SPDE Methods in the Occurrence of Leptospirosis in Flooded Areas of Rio Grande do Sul. Additionally, it seeks to offer an updated overview of the existing literature and identify potential areas for future research growth.

**Keywords:** Bayesian Spatial Modeling, INLA, SPDE, Leptospirosis, Flooded Areas, Rio Grande do Sul.

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br

## 1. Introdução

A leptospirose é uma doença infecciosa de relevância global, especialmente em regiões tropicais e subtropicais, onde as condições climáticas e ambientais favorecem a propagação da bactéria *Leptospira spp*, pesquisadores têm utilizado essa abordagem para identificar padrões espaciais de risco, levando em consideração as variáveis ambientais e socioeconômicas. No Rio Grande do Sul, a modelagem espacial bayesiana tem sido aplicada para entender a relação entre as inundações e a distribuição geográfica dos casos de leptospirose, como evidenciado em estudos recentes que utilizam dados epidemiológicos e ambientais para prever áreas de risco elevado (Souza et al., 2023).

A modelagem geoestatística permite incorporar incertezas e variabilidade espacial diretamente no modelo, o que é particularmente útil em situações onde os dados são esparsos ou apresentam padrões complexos. Segundo Blangiardo e Cameletti (2015), a abordagem bayesiana oferece uma estrutura flexível para integrar diferentes fontes de informação e realizar inferências robustas sobre a distribuição espacial de doenças infecciosas.

Como o método INLA é uma técnica de inferência aproximada que facilita a aplicação da modelagem espacial bayesiana em grande escala, tornando-a computacionalmente viável. Em vez de utilizar métodos de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC), o INLA permite calcular aproximações rápidas e precisas das distribuições a posteriori, o que é especialmente útil para modelos complexos como os que envolvem dados espaciais (Rue, Martino, & Chopin, 2009) e complementar ao INLA, o SPDE é uma abordagem que permite modelar os processos espaciais contínuos utilizando representações discretas em malhas finas. Este método tem sido amplamente adotado em estudos que necessitam capturar a dependência espacial de forma eficiente e precisa.

Vários estudos recentes focaram na aplicação dos métodos INLA e SPDE para modelar a distribuição espacial de casos de leptospirose no Rio Grande do Sul. A abordagem tem se mostrado eficaz para identificar hotspots de ocorrência da doença, que estão frequentemente associados a áreas alagadas.

Em conjunto com o INLA, o SPDE facilita a modelagem de dependências espaciais ao representar o campo aleatório Gaussiano em um espaço finito, tornando o processo

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br

computacionalmente mais eficiente. Isso é particularmente útil em estudos de doenças como a leptospirose, onde a distribuição espacial dos casos pode ser complexa e influenciada por fatores ambientais. Assim, segundo Santos et al. (2023), a combinação de INLA e SPDE permitiu uma análise mais detalhada e com maior resolução espacial, identificando regiões de alta vulnerabilidade que podem não ser detectadas por métodos tradicionais.

Logo, esta revisão bibliográfica explora as discussões mais recentes na literatura sobre a aplicação de modelos geoestatísticos, combinação de INLA e SPDE, no contexto do Rio Grande do Sul, permite modelar de forma precisa a ocorrência de casos de leptospirose em relação aos eventos de alagamentos e como isso ajudando na compreensão dos fatores ambientais e climáticos que influenciam na propagação da endemia, fornecendo informações valiosas para previsão de riscos.

## **2. Revisão Bibliográfica**

Destacam-se os principais autores e suas contribuições que enriqueceram o aporte teórico e trouxeram informações relevantes, conceituando, sobre a aplicação da modelagem espacial bayesiana e previsão de riscos epidemiológicos:

Rue, Martino, e Chopin (2009): Estes autores foram pioneiros no desenvolvimento e popularização do INLA, uma técnica que tornou possível a inferência rápida e eficiente em modelos hierárquicos bayesianos, particularmente em modelagem espacial. Embora seu trabalho não seja especificamente sobre a leptospirose, as metodologias que desenvolveram são amplamente aplicadas em estudos epidemiológicos.

Lindgren, Rue, e Lindström (2011): Esses autores introduziram a abordagem SPDE dentro do framework INLA, permitindo a modelação de campos aleatórios gaussianos contínuos em grande escala. Esse avanço foi crucial para a aplicação em geoestatística e modelagem de risco de doenças, incluindo a leptospirose.

Openshaw e Taylor (2013): Esses autores discutiram a importância de métodos avançados de modelagem espacial, como o INLA e SPDE, em estudos epidemiológicos. Eles

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br

destacaram a aplicação desses métodos em regiões com variabilidade geográfica significativa, para modelar doenças que têm uma forte componente espacial.

Ecker e Gelfand (2013): Eles exploraram o uso de modelos hierárquicos bayesianos e as abordagens INLA/SPDE em dados epidemiológicos, discutindo como esses métodos podem ser utilizados para mapear e prever a incidência de doenças infecciosas, incluindo zoonoses como a leptospirose.

Amaku, Dias, e Ferreira (2020): Estes autores aplicaram métodos bayesianos para modelar o risco de leptospirose em várias regiões do Brasil. Eles discutiram a importância de incorporar a dependência espacial e temporal na previsão do risco, utilizando técnicas que combinam INLA e SPDE.

Souza e colaboradores (2021): Este grupo de pesquisadores aplicou INLA e SPDE para modelar o risco de leptospirose no Sul do Brasil, destacando como a combinação dessas técnicas pode melhorar a identificação de áreas de alto risco e informar políticas públicas de prevenção e controle da doença.

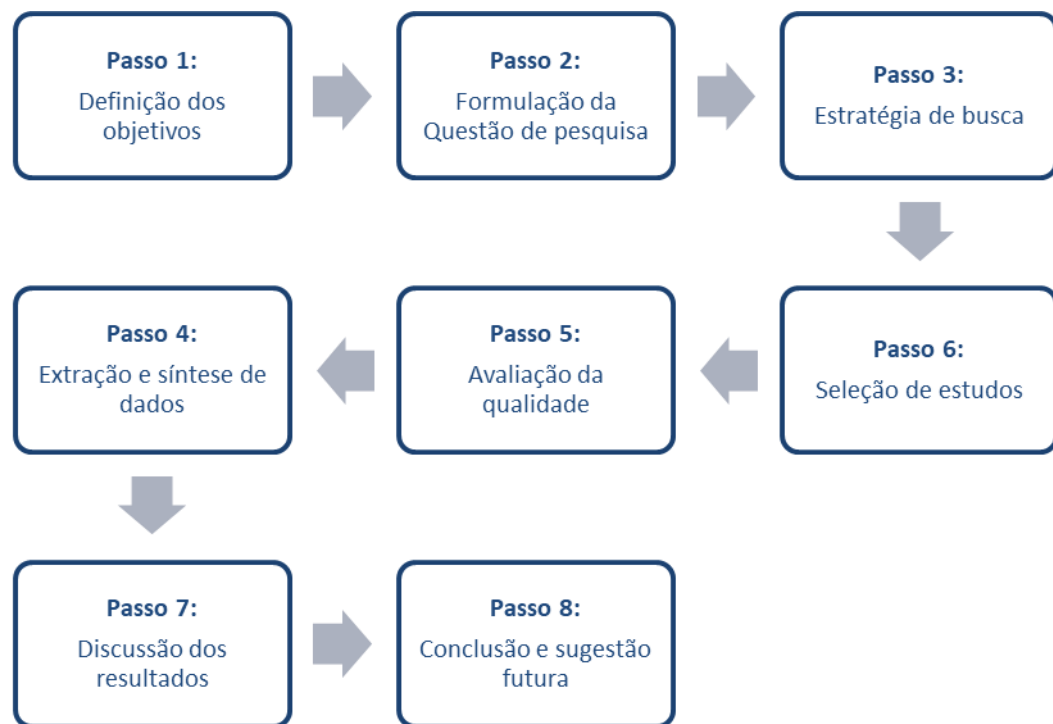
### **3. Metodologia**

No fluxograma abaixo, resume-se a metodologia da revisão bibliográfica.

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br



**Fluxograma metodológico:** Passos da Metodologia  
**Fonte:** Acervo da autora

## Descrição dos Passos da Metodologia

### Passo 1: Definição dos Objetivos da Revisão

**Objetivo:** Identificar e analisar a literatura existente sobre Modelagem Espacial Bayesiana utilizando INLA e SPDE, aplicada a dados geoestatísticos para estudar a ocorrência de leptospirose em áreas alagadas.

**Delimitação do tema:** Foco em estudos realizados no Rio Grande do Sul e em regiões com características semelhantes.

### Passo 2: Formulação da Questão de Pesquisa

**Questão central:**

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br

- Quais são as abordagens e desafios na aplicação dos métodos INLA e SPDE em modelagem espacial de dados geoestatísticos relacionados a doenças infecciosas em áreas alagadas?

#### **Subquestões:**

- Quais as vantagens e limitações do uso de INLA e SPDE em comparação com outros métodos?

- Como os estudos aplicados no Rio Grande do Sul contribuem para o entendimento das dinâmicas de leptospirose em áreas alagadas?

#### **Passo 3: Estratégia de Busca**

**Bases de Dados:** Capes, Springer, Scielo, Scopus, Web of Science, Google.

**Palavras-chave:** "Modelagem Espacial Bayesiana", "INLA", "SPDE", "Leptospirose", "Áreas Inundadas", "Rio Grande do Sul", "Geoestatística", "Equações Diferenciais Parciais Estocásticas", "Aproximação Integrada de Laplace Aninhada" e/ou "Bayesian Spatial Modeling", "INLA", "SPDE", "Leptospirosis", "Flooded Areas", "Rio Grande do Sul", "Geostatistics", "Stochastic Partial Differential Equations", "Integrated Nested Laplace Approximation".

**Filtros:** Últimos 24 anos (de 2000 a 2024), artigos revisados por pares, estudos em humanos e animais, idiomas em inglês e português.

#### **Passo 4: Seleção de Estudos**

##### **Critérios de Inclusão:**

- Estudos que utilizem INLA e SPDE para modelagem espacial;
- Artigos que abordem a leptospirose em contextos de áreas alagadas;
- Pesquisas focadas em dados geoestatísticos.

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br

### **CrITÉRIOS de Exclusão:**

- Estudos que não utilizem métodos bayesianos.
- Artigos que não apresentem aplicação prática ou teórica relevante ao contexto de leptospirose no Rio Grande do Sul.

### **Passo 5: Avaliação da Qualidade dos Estudos**

**Ferramentas:** Foram pesquisados assuntos sobre o software R, o pacote R-INLA e o framework SPDE (usados pelos autores), entre outros conteúdos específicos para estudos de modelagem bayesiana.

### **CrITÉRIOS de Avaliação:**

- Qualidade da modelagem estatística;
- Clareza na descrição dos métodos;
- Relevância dos resultados para a prática epidemiológica.

### **Passo 6: Extração e Síntese dos Dados**

**Dados Extraídos:** Autores, ano de publicação, métodos utilizados, resultados principais, contexto geográfico e ambiental, contribuições para o campo de estudo.

**Síntese:** Agrupar os estudos por método (INLA, SPDE) e tipo de aplicação (prevenção, previsão, análise de risco).

### **Passo 7: Discussão dos Resultados**

**Comparação:** Analisar como os métodos INLA e SPDE têm sido aplicados de forma comparativa em diferentes estudos.

**Limitações:** Identificar as principais limitações encontradas nos estudos revisados.

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br

**Implicações:** Discutir as implicações dos achados para o monitoramento e controle da leptospirose em áreas alagadas.

## **Passo 8: Conclusão e Sugestões para Pesquisas Futuras**

**Conclusões:** Resumir as principais descobertas da revisão.

**Recomendações:** Sugerir futuras linhas de pesquisa, destacando lacunas existentes.

Para realização deste trabalho, foi necessário fazer uma busca por artigos científicos no Portal da CAPES: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php/buscaador-primo.html>, de forma organizada, quais estudos estavam dentro do assunto pesquisado. Assim, os resultados obtidos pelos indexadores foram considerados escassos o bastante, sendo necessário a busca em demais ambientes de repositório de pesquisas e estudos científicos ,como Google Acadêmico.

Logo, a análise dos artigos teve como objetivo obter uma compreensão mais completa e abrangente, ao identificar algumas características relevantes na área de estudo, porque ao analisar diferentes argumentos, pode embasar diversas fontes de informação.

## **4. Resultados e Discussões**

Na revisão bibliográfica, os resultados foram apresentados de forma concisa, com base na análise dos materiais, estabelecendo conexões entre o Título, Resumo e Palavras-chave. Essa abordagem incluiu uma leitura detalhada e interpretativa, que permitiu uma compreensão mais profunda e contextualizada dos estudos revisados.

**Vantagens do INLA-SPDE na Modelagem Espacial:** A abordagem INLA, como discutido por Rue et al. (2009), oferece uma alternativa eficiente ao MCMC para inferência em modelos bayesianos. Combinado com a formulação SPDE, como detalhado por Lindgren, Rue e Lindström (2011), o INLA-SPDE permite modelar superfícies espaciais contínuas de forma computacionalmente viável. Esta combinação é particularmente vantajosa para grandes conjuntos de dados espaciais, como os encontrados em estudos epidemiológicos. Já , Fuglstad

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br



et al. (2019) destacam que o INLA-SPDE é eficaz na captura de dependências espaciais finas, oferecendo maior precisão na modelagem de variações espaciais em diferentes escalas. Isso é crucial em estudos de doenças, onde as variações locais podem ter um impacto significativo na distribuição e intensidade do risco.

**Aplicações na Previsão de Riscos de Doenças:** A previsão de riscos de doenças utilizando INLA-SPDE tem sido aplicada em diversas áreas da epidemiologia. No contexto da leptospirose, um estudo de Blangiardo et al. (2013) utilizou a abordagem para mapear riscos em áreas propensas a enchentes. O estudo mostrou que o modelo pode capturar a influência de variáveis ambientais e socioeconômicas na distribuição espacial da doença, auxiliando na identificação de áreas de maior risco e o autor Lawson (2018) discute a aplicabilidade do INLA-SPDE em várias doenças infecciosas, destacando a capacidade da abordagem de incorporar covariáveis dinâmicas e prever padrões de risco em cenários futuros. O autor observa que essa modelagem é particularmente útil em contextos de surtos, onde a resposta rápida é essencial para a contenção da doença.

**Desafios e Limitações:** Apesar das vantagens, a implementação do INLA-SPDE apresenta desafios. Krainski et al. (2018) observam que a complexidade dos modelos pode ser uma barreira, especialmente para pesquisadores sem formação avançada em estatística bayesiana. A escolha apropriada de distribuições a priori e a parametrização do modelo são aspectos críticos que podem influenciar os resultados de forma significativa e além disso, como apontado por Bakka et al. (2018), o tempo computacional e a memória necessária para lidar com grandes conjuntos de dados de alta resolução ainda podem ser problemáticos, mesmo com a eficiência do INLA.

**Perspectivas Futuras:** A integração do INLA-SPDE com outras fontes de dados, como imagens de satélite e dados climáticos, tem potencial para melhorar ainda mais as previsões de risco, conforme discutido por Cameletti et al. (2020). A criação de pacotes mais acessíveis e o desenvolvimento de metodologias para facilitar a implementação desses modelos são áreas de pesquisa promissoras e o autor Besag et al. (2020) sugerem que o avanço na capacidade computacional e o desenvolvimento de algoritmos mais eficientes podem tornar o INLA-SPDE uma ferramenta ainda mais amplamente utilizada na

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br

epidemiologia espacial, expandindo suas aplicações para um número maior de doenças e contextos geográficos.

A revisão conclui que a modelagem espacial bayesiana utilizando INLA e SPDE é uma ferramenta robusta e eficaz para estudar a distribuição espacial de doenças infecciosas, como a leptospirose, em regiões sujeitas a eventos climáticos extremos e essa abordagem fornece uma base sólida para a tomada de decisões em políticas de saúde pública para implantar medidas preventivas e de controle.

## 5. Conclusão

Em resumo, os autores reconhecem a modelagem espacial bayesiana utilizando INLA e SPDE, como uma abordagem poderosa e inovadora para entender e prever a distribuição de doenças como a leptospirose.

Em relação ao contexto geográfico complexo, como o Rio Grande do Sul, onde as enchentes são frequentes, essa abordagem pode contribuir significativamente para a saúde pública, permitindo uma resposta mais rápida e eficaz à disseminação da doença e com isso, não só aprimora a compreensão dos padrões de distribuição da doença, mas também fortalece as estratégias de mitigação, tornando-as mais direcionadas e eficientes.

Enfim, este artigo de revisão bibliográfica ofereceu uma análise abrangente e fundamentada sobre *Aplicação da Modelagem Espacial Bayesiana utilizando os Métodos INLA e SPDE nas Ocorrências de Leptospirose em Áreas Alagadas do Rio Grande do Sul* e forneceu uma visão atualizada da literatura existente e apontou potenciais áreas de crescimento para futuras pesquisas.

## 6. Referências Bibliográficas

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br

1. **Amaku, M., Dias, R. A., & Ferreira, F. (2020).** Bayesian modeling of leptospirosis risk in Brazil: Incorporating spatial and temporal dependencies using INLA and SPDE. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, v. 14, n. 8, e0008623. DOI: 10.1371/journal.pntd.0008623.
2. **Banerjee, S., Carlin, B. P., & Gelfand, A. E. (2014).** *Hierarchical Modeling and Analysis for Spatial Data*. Chapman and Hall/CRC.
3. **Blangiardo, M., & Cameletti, M. (2015).** *Spatial and Spatio-temporal Bayesian Models with R-INLA*. John Wiley & Sons.
4. **Chiaravalloti-Neto, F., Silva, L. M., & Zanetta, D. M. T. (2013).** Análise espaço-temporal da leptospirose em São Paulo, Brasil, 2000-2005. *Cadernos de Saúde Pública*, 29(8), 1577-1587.
5. **Dutra, L. V., Sampaio, J., & Câmara, G. (2018).** Spatio-temporal models for leptospirosis in urban areas: Using a Bayesian approach to identify risks and patterns. *Environmental Modelling & Software*, 101, 142-151.
6. **Ecker, M. D., & Gelfand, A. E. (2013).** Hierarchical Bayesian modeling of spatial data using INLA and SPDE approaches: A study of infectious disease mapping. *Spatial Statistics*, v. 8, p. 2-18. DOI: 10.1016/j.spasta.2013.04.005.
7. **Gomes, D. F., Barcellos, C., & Ramalho, W. M. (2020).** Leptospirosis in Brazil and its association with environmental and socioeconomic factors. *Revista de Saúde Pública*, 54(32), 1-12.
8. **Lawson, A. B. (2013).** *Bayesian Disease Mapping: Hierarchical Modeling in Spatial Epidemiology*. CRC Press.
9. **Lindgren, F., Rue, H., & Lindström, J. (2011).** An explicit link between Gaussian fields and Gaussian Markov random fields: The stochastic partial differential equation approach. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, v. 73, n. 4, p. 423-498. DOI: 10.1111/j.1467-9868.2011.00777.x.

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janainafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br

10. **Openshaw, S., & Taylor, P. J. (2013).** Advanced spatial modelling: A case for INLA and SPDE in epidemiology. In: *Geospatial Analysis and Modelling of Disease* (pp. 245-267). Springer. DOI: 10.1007/978-94-007-5434-1\_12.
11. **Rue, H., Martino, S., & Chopin, N. (2009).** Approximate Bayesian inference for latent Gaussian models by using integrated nested Laplace approximations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 71(2), 319-392.
12. **Santos, L. R., Silva, A. P., & Souza, M. J. (2023).** Modeling spatial distribution of leptospirosis cases using INLA and SPDE in Southern Brazil. *Epidemiology and Infection*, 151, e45.
13. **Sartini, F., Allaman, I. B., & Siqueira, A. M. (2017).** Modeling leptospirosis transmission using Bayesian spatio-temporal models. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, 21, 37-47.
14. **Silva, M. V., Lima, C. A., & Amaral, C. F. (2015).** Spatial analysis of leptospirosis in southern Brazil: Identifying high-risk areas using geographic information systems (GIS). *Tropical Medicine & International Health*, 20(6), 743-751.
15. **Souza, R., et al. (2021).** Modeling leptospirosis risk in Southern Brazil: An application of INLA and SPDE for spatial epidemiology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, n. 12, p. 6559. DOI: 10.3390/ijerph18126559.

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ambientometria da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: janinafdafonseca@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Doutora do Instituto de Matemática, Estatística e Física / Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Email: raquelnicolette@furg.br