

**ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DA DISTRIBUIÇÃO DA MALÁRIA NA ÁREA URBANA
DE PORTO VELHO**

**GEOSTATISTICAL ANALYSIS OF MALARIA DISTRIBUTION IN THE URBAN AREA
OF PORTO VELHO**

**ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA MALARIA EN LA ZONA
URBANA DE PORTO VELHO**

Josiane Rodrigues¹

¹ Licenciada em Matemática pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP/Rio Claro, mestrado em Estatística e Experimentação Agronômica – ESALQ/USP, doutorado em Estatística e Experimentação Agronômica – ESALQ/USP. Atualmente é Professora Adjunta no CCA/UFSCar – Rodovia Anhanguera, km 174 - SP-330 - Araras - SP - BR CEP: 13600-970, tel. (19) 3543-2667. E-mail: josirodrigues@ufscar.br.

RESUMO

A malária é a protozoose de maior impacto no mundo, colocando em risco em torno de 40% de toda a população mundial, em mais de 100 países, caracterizando-se por se desenvolver em regiões tropicais e subtropicais, especialmente em nações em desenvolvimento ou subdesenvolvidas. No Brasil, 99% dos casos se concentram na Amazônia Legal, sendo que o estado de Rondônia se caracteriza como uma região puramente endêmica, dadas as condições ambientais propícias ao desenvolvimento do vetor transmissor da malária. A capital do estado, Porto Velho, também apresenta alta endemicidade de malária, e desempenha um papel importante na disseminação do parasita. Dessa forma, o estudo do comportamento espacial da doença na região é de fundamental importância, pois constitui importante instrumento de apoio ao planejamento e ações contra a proliferação da doença. Assim, o presente estudo tem como objetivo estimar as áreas de risco para a ocorrência da malária na área urbana de Porto Velho, Rondônia, utilizando para isso ferramentas de geoestatística. Com isso, pretende-se auxiliar na detecção de áreas de risco da cidade, subsidiando assim ações de saúde pública na região.

Descritores: administração em saúde pública; doenças endêmicas; localizações geográficas.

ABSTRACT

Malaria is the protozoa with the greatest impact in the world, putting at risk around 40% of the entire world population, in more than 100 countries, characterized by its development in tropical and subtropical regions, especially in developing or underdeveloped nations. In Brazil, 99% of cases are concentrated in the Legal Amazon, and the state of Rondônia is characterized as a purely endemic region, given the environmental conditions favorable to the development of the vector that transmits malaria. The state capital, Porto Velho, is also highly endemic to malaria, and plays an important role in the spread of the parasite. Thus, the study of the spatial behavior of the disease in the region is of fundamental importance, as it constitutes an important instrument to support planning and actions against the spread of the disease. Thus, this study aims to estimate the risk areas for the occurrence of malaria in the urban area of Porto Velho, Rondônia, using geostatistical tools. With this, it is intended to assist in the detection of risk areas in the city, thus subsidizing public health actions in the region.

Key words: public health administration; endemic diseases; geographic locations.

RESUMEN

La malaria es el protozoo de mayor impacto en el mundo, poniendo en riesgo alrededor del 40% de toda la población mundial, en más de 100 países, caracterizada por su desarrollo en regiones tropicales y subtropicales, especialmente en naciones en vías de desarrollo o subdesarrolladas. En Brasil, 99% de los casos se concentran en la Amazonía Legal, y el estado de Rondônia se caracteriza por ser una región puramente endémica, dadas las condiciones ambientales favorables al desarrollo del vector transmisor de la malaria. La capital del estado, Porto Velho, también es altamente endémica de malaria y juega un papel importante en la propagación del parásito. Así, el estudio del comportamiento espacial de la enfermedad en la región es de fundamental importancia, ya que constituye un importante instrumento de apoyo a la planificación y acciones contra la propagación de la enfermedad. Así, este estudio tiene como objetivo estimar las áreas de riesgo de ocurrencia de malaria en el área urbana de Porto Velho, Rondônia, utilizando herramientas geostatísticas. Con esto, se pretende ayudar en la detección de áreas de riesgo en la ciudad, subsidiando así acciones de salud pública en la región.

Descriptor: administración en salud pública; enfermedades endémicas; ubicaciones geográficas.

INTRODUÇÃO

A malária, também conhecida como paludismo, febre terçã (benigna ou maligna) febre quartã, tremedeira, batedeira ou, simplesmente, febre, é uma doença transmitida pela fêmea do mosquito do gênero *Anopheles* e seu agente etiológico é um protozoário do gênero *Plasmodium*⁽¹⁾.

Os sintomas da malária caracterizam-se principalmente por febre elevada, sudorese profusa e calafrios, em padrões geralmente cíclicos, de acordo com o agente etiológico. Se não tratada adequadamente, a doença pode evoluir para a sua forma grave, com febre superior a 41°C, hiperparasitemia, anemia intensa, icterícia, hemorragias e hipotensão arterial, levando a coma e óbito⁽¹⁾.

A malária se trata da protozoose de maior impacto no mundo, colocando em risco em torno de 40% de toda a população mundial, em mais de 100 países. É uma doença que se caracteriza por se desenvolver em regiões tropicais e subtropicais, flagelando expressivo contingente da população, especialmente nas nações em desenvolvimento ou subdesenvolvidas⁽²⁾.

A doença ocorre, principalmente, na África, na região amazônica da América do Sul e no Sudeste Asiático, sendo que a sua maior incidência se dá no continente africano, de forma mais precisa ao sul do deserto do Saara⁽²⁾.

O Brasil é o país que concentra o maior número de casos no continente americano, estimando-se a ocorrência de mais de 300.000 casos anuais⁽²⁾. No país, onde a doença é endêmica, 99% dos casos se concentram na Amazônia Legal, que abrange os Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins, e calcula-se que em torno de 49 milhões de pessoas vivam em área de risco⁽¹⁾.

Diante tal exposto, é possível afirmar que um dos problemas de saúde pública mais sérios que afeta a Amazônia Legal é a malária. No ano de 2005, dos 603.127 casos registrados na região amazônica, 77,2% foram procedentes dos Estados do Amazonas, Pará e Rondônia e, neste mesmo ano, Rondônia registrou 118.611 casos, correspondendo a 19,7% do total de casos para esta área⁽³⁾, o que o caracteriza como uma região puramente endêmica, dadas as condições ambientais propícias ao desenvolvimento do vetor transmissor da malária. Por sua vez, a capital do estado, Porto Velho, também apresenta alta endemicidade de malária e desempenha um papel importante na disseminação do parasita para outros municípios da Amazônia e até mesmo para áreas não endêmicas do país⁽⁴⁾.

Dessa forma, o estudo do comportamento espacial da doença na região é de fundamental importância, pois constitui um importante instrumento de apoio ao planejamento e ações contra a proliferação da doença no espaço urbano. A identificação de regiões heterogêneas tem sido uma prática habitual e desenvolvida por diferentes metodologias, o que pode ocorrer, por exemplo, pelo uso de técnicas de análise geoestatística, com o auxílio de sistemas de informações geográficas⁽⁵⁾.

O termo geoestatística refere-se ao estudo de um fenômeno natural que pode ser caracterizado pela distribuição no espaço de uma ou mais variáveis, chamadas de “variáveis regionalizadas”⁽⁶⁾. No estudo do comportamento dessas variáveis, duas são as ferramentas fundamentais dos métodos geoestatísticos: o semivariograma e a krigagem⁽⁷⁾.

A krigagem é um método de interpolação cujo objetivo é estimar valores de uma dada variável para qualquer local, sendo esta estimativa uma combinação linear de valores medidos, podendo-se então, interpolar valores em qualquer posição na área de estudo⁽⁸⁾. O semivariograma, por sua vez, é a ferramenta básica de suporte à técnica de krigagem, pois permite modelar a dependência espacial entre as amostras⁽⁹⁾.

O uso dos métodos geoestatísticos permite uma visualização espacial das variáveis na área de interesse, por meio de mapas de predição, o que constitui um aspecto de inquestionável importância, uma vez que ampara tecnicamente as decisões estratégicas que serão tomadas numa determinada região⁽¹⁰⁾, as quais estão associadas, por exemplo, ao controle e o monitoramento de doenças, a medidas de profilaxia mais adequadas, a possibilidade de uma avaliação constante das medidas de controle empregadas e ao fornecimento de informações atualizadas da real situação epidemiológica no espaço geográfico⁽⁵⁾.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo estimar as áreas de risco para a ocorrência da malária na área urbana de Porto Velho, Rondônia, utilizando para isso ferramentas de geoestatística. Com isso, pretende-se auxiliar na detecção de áreas de risco da cidade, subsidiando assim ações de saúde pública na região.

MÉTODOS

Os dados analisados consistem em uma planilha com todos os bairros da região urbana da cidade de Porto Velho, Rondônia, bem como a sua localização geográfica (latitude e longitude), número de infectados pela malária no ano de 2000, por bairro, e respectivo número de habitantes de cada um deles, neste mesmo ano⁽¹¹⁾. Para a análise geoestatística, considerou-se a porcentagem de infectados em cada um dos bairros, a qual foi dada pela razão entre o número de infectados e o número de habitantes de cada bairro.

Inicialmente o conjunto de dados passou por uma análise exploratória, sendo retirados do mesmo todos os pontos que representavam outliers. Posteriormente, os dados foram submetidos a uma transformação Box-Cox, a fim de atender a pressuposição de normalidade.

Em seguida, construiu-se o semivariograma empírico, o qual é o gráfico das semivariâncias em função da distância a um determinado ponto. A magnitude da semivariância entre dois pontos depende da distância entre eles, implicando em semivariâncias menores para distâncias menores e semivariâncias maiores para distâncias maiores. A partir de uma certa distância a semivariância não mais aumenta e se estabiliza num valor igual à variância média, dando a esta região o nome de silo ou patamar.

A distância entre o início do semivariograma e o começo do silo recebe o nome de range (σ^2). Ao extrapolarmos a curva do semivariograma para a distância zero, podemos chegar a um valor não nulo de semivariância. Este valor recebe o nome de nugget (τ^2). Além disso, a projeção do ponto

onde a semivariância se estabiliza ao eixo das abcissas nos dá o valor de 3ϕ , onde ϕ é o alcance da dependência espacial.

A semivariância foi calculada a partir da seguinte fórmula⁽¹²⁾:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [y(x_i + h) - y(x_i)]^2,$$

em que $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância estimada a uma distância h , $N(h)$ é o número de pares de valores $[y(x_i); y(x_i + h)]$ separados por uma distância h , x_i é a posição espacial da variável y , e y corresponde ao valor da proporção de infectados.

Após a obtenção do semivariograma empírico, foi ajustado um modelo teórico que melhor o representa, tendo como variáveis σ^2 (range), τ^2 (nugget) e ϕ (alcance da dependência espacial). Para obtenção do modelo teórico, valores iniciais para cada um dos parâmetros foram sugeridos visualmente por meio da análise do semivariograma empírico e, em seguida, a partir do método da máxima verossimilhança, as estimativas finais de cada um dos parâmetros foi encontrada e o modelo foi ajustado.

Para validação do modelo, foram calculados os valores do Critério de Informação de Akaike (AIC) e do Critério de Informação Bayesiano (BIC) para o modelo espacial teórico e também para o modelo não espacial. A decisão da escolha do melhor modelo foi realizada avaliando qual apresentou menor valor para cada um dos critérios. Com isso, buscou-se verificar a existência de uma dependência espacial no conjunto de dados.

Com o mesmo objetivo, foram construídas bandas de confiança (envelope simulado) para testar a hipótese de ausência de dependência espacial. O envelope simulado consiste em simular semivariogramas empíricos com base no modelo de semivariograma ajustado (teórico) em diferentes distâncias h . Com isso, são construídas bandas de confiança em que os limites correspondem aos menores e maiores valores, respectivamente, dos M semivariogramas empíricos simulados⁽¹³⁾. Se ao menos um ponto do semivariograma do modelo ajustado estiver fora das bandas de confiança, a hipótese de ausência de dependência espacial é rejeitada.

Uma vez ajustado o semivariograma teórico e tendo-se confirmada a dependência espacial dos dados, a krigagem ordinária foi utilizada para estimar os valores de proporção de doentes nas localizações não observadas na área urbana da cidade. Essa técnica possibilita encontrar estimativas

sem tendência e com variância mínima⁽¹⁴⁾. Por fim, após a estimativa dos dados de proporção resultantes da krigagem, foi obtido o mapa da proporção de infectados por malária na área urbana de Porto Velho no ano de 2000.

Todas as análises estatísticas foram feitas usando o software R⁽¹⁵⁾.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra a localização geográfica da proporção do número de infectados por malária na área urbana do município de Porto Velho, Rondônia, no ano de 2000, após a retirada dos outliers do conjunto de dados. Pela Figura, fica evidente a distribuição irregular na proporção de casos da doença, sendo que os pontos em vermelho correspondem a alta proporção de infectados, seguidos pelos pontos em laranja, amarelo, verde e azul, nessa mesma ordem.

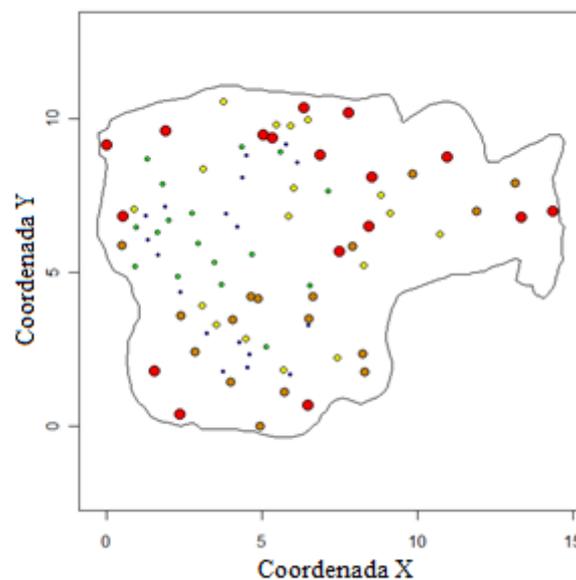


Figura 1. Localização geográfica da proporção do número de infectados por malária na área urbana do município de Porto Velho, Rondônia, no ano de 2000. Da proporção mais baixa para a mais alta: cores azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. Pontos maiores estão associados a regiões com maior proporção de infectados no período.

Os dados inicialmente foram submetidos à transformação Box-Cox ($\lambda = 0,1$), de forma a atender a pressuposição de normalidade. A localização geográfica da proporção de casos de malária após a transformação e o histograma dos dados transformados estão apresentados na Figura 2.

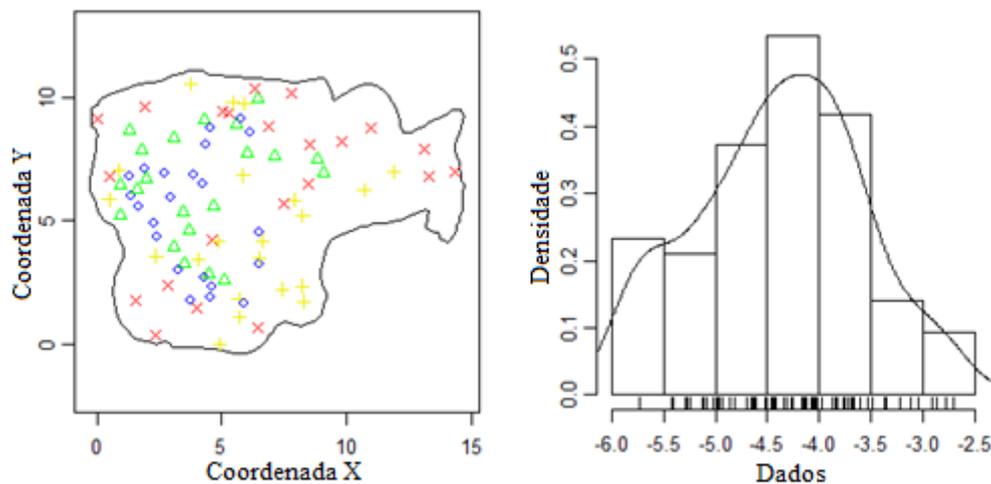


Figura 2. (A) Localização geográfica da proporção do número de infectados por malária na área urbana do município de Porto Velho, Rondônia, no ano de 2000, após a transformação Box-Cox. Da proporção mais baixa para a mais alta: cores azul, verde, amarelo e vermelho. (B) Histograma dos dados de proporção do número de infectados por malária na área urbana do município de Porto Velho, Rondônia, no ano de 2000, após a transformação Box-Cox.

A Figura 3 apresenta o semivariograma empírico para a proporção de doentes, sendo ele construído a partir do cálculo da semivariância, a qual é a medida do grau de dependência espacial entre duas amostras. Pelo gráfico é possível observar que distâncias maiores implicam em uma semivariância maior, mas esse comportamento tende a se estabilizar a partir de um determinado ponto. Valores iniciais para σ^2 , τ^2 e ϕ foram sugeridos visualmente pelo semivariograma e, a partir do método da máxima verossimilhança, foi ajustado o modelo exponencial aos dados (Figura 3).

As estimativas dos parâmetros obtidas pelo método da máxima verossimilhança para o modelo exponencial estão dadas na Tabela 1. Os valores de AIC e BIC para o modelo exponencial e não espacial, por sua vez, estão apresentados na Tabela 2. É possível verificar que o modelo espacial se adequa melhor aos dados em relação ao não-espacial, uma vez que o AIC e o BIC para o modelo espacial são menores, caracterizando uma maior verossimilhança.

Além disso, como citado, a existência de dependência espacial também pode ser verificada através da análise gráfica, utilizando envelopes simulados (Figura 4). Para que haja dependência, deve haver ao menos um ponto do semivariograma fora do envelope simulado, pois isso implica na rejeição da hipótese de que não existe dependência espacial no conjunto. Pela Figura 4, é possível

observar dois pontos fora da banda de confiança e, por isso, pode-se afirmar que existe dependência espacial nos dados de proporção de infectados por malária na área urbana de Porto Velho.

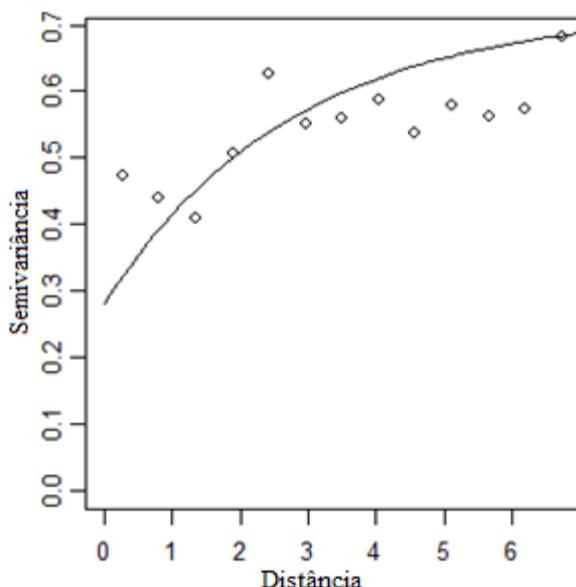


Figura 3. Semivariograma empírico (pontos) e modelo de semivariograma exponencial ajustado aos dados de proporção do número de infectados por malária na área urbana do município de Porto Velho, Rondônia, no ano de 2000.

Tabela 1. Estimativas de máxima verossimilhança dos parâmetros do modelo geoestatístico exponencial, para os dados de proporção de infectados por malária na área urbana do município de Porto Velho, Rondônia, no ano de 2000.

| Modelo / Parâmetro | $\hat{\sigma}^2$ | $\hat{\tau}^2$ | $\hat{\phi}$ | $\hat{\beta}^*$ |
|--------------------|------------------|----------------|--------------|-----------------|
| Exponencial | 0,4406 | 0,2819 | 2,7643 | -3,8305 |

* β corresponde ao parâmetro associado ao modelo exponencial.

Tabela 2. Valores do Critério de Informação de Akaike (AIC) e do Critério de Informação Bayesiano (BIC) para o modelo exponencial e para o modelo não espacial.

| Modelo | AIC | BIC |
|------------------------|--------|--------|
| Espacial (Exponencial) | -715,2 | -705,4 |
| Não espacial | -703,0 | -698,0 |

Verificada a existência de dependência espacial no conjunto de dados, foi realizado o processo de krigagem ordinária, que permite estimar valores da variável de interesse em locais não amostrados.

A partir dos dados obtidos com a krigagem, construiu-se o mapa de predição (Figura 5). Os locais em vermelho no gráfico representam as regiões onde a proporção de indivíduos infectados com a malária no ano de 2000 foi maior. Em seguida, seguem os locais em amarelo e, por último, os locais em verde representam aqueles onde a proporção de infectados foi a mais baixa.

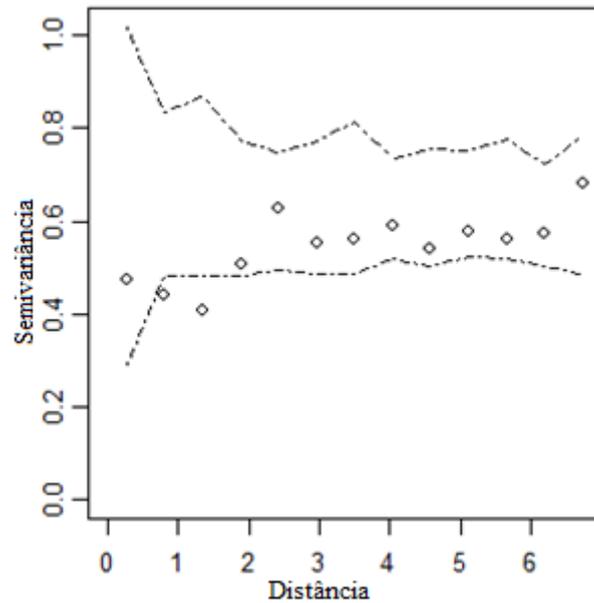


Figura 4. Envelope simulado para testar a hipótese nula de ausência de dependência espacial nos dados de proporção de infectados por malária na área urbana do município de Porto Velho, Rondônia, no ano de 2000.

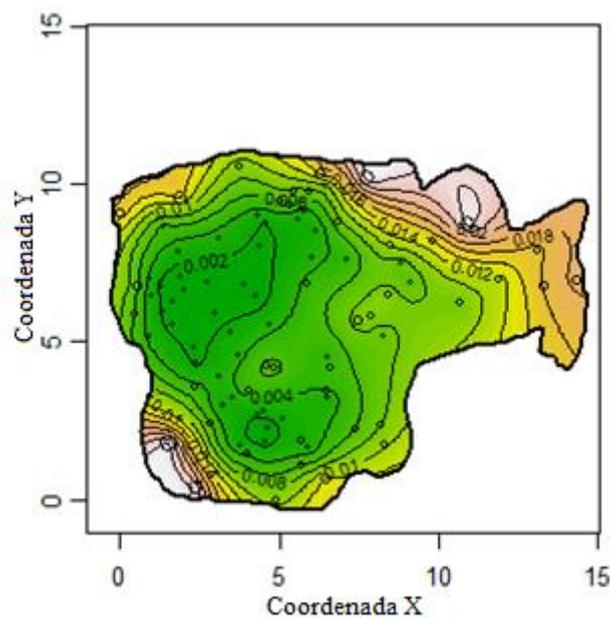


Figura 5. Mapa de krigagem ordinária para a variável proporção de infectados por malária na área urbana do município de Porto Velho, Rondônia, no ano de 2000.

Pelo mapa da krigagem é possível perceber que os locais mais afetados pela malária na área urbana de Porto Velho se localizam na periferia, especialmente nas regiões sudoeste, nordeste, leste e noroeste (Figura 5).

A região sudoeste, por ser de floresta natural, torna muito favorável a proliferação do vetor da doença, o que torna a região puramente endêmica. Apesar da baixa densidade populacional, existe uma incidência de casos muito elevada⁽¹¹⁾.

Nas regiões nordeste e leste, também muito afetadas pela doença, a urbanização ocorreu por meio da distribuição de lotes pela prefeitura e, também, por meio de invasões. Nas invasões, as residências são construídas próximas aos ambientes focais, levando a população a ficar exposta à doença. Além disso, em função da existência de resquícios de florestas e do baixo relevo e ausência de galerias pluviais, na época das chuvas, forma-se um ambiente favorável aos criadouros do vetor transmissor da doença, além dos fatores antrópicos que também têm interferência na proliferação da doença nas regiões⁽¹¹⁾.

Por fim, a região noroeste, também bastante afetada pela endemia de malária, apresenta diversos problemas socioambientais que podem ser atribuídos a dois fatores: primeiro, aos canais de drenagem, que oferecem condições propícias ao desenvolvimento do vetor da doença e, segundo, é o de que existe interferência humana nesta região, uma vez que os canais de drenagem são transformados em depósito de lixo, promovendo assim a formação de um ambiente focal⁽¹¹⁾.

CONCLUSÕES

A partir do presente estudo foi possível verificar que as técnicas geoestatísticas são uma ferramenta de fundamental importância no estudo de dados epidemiológicos, visto que fornecem uma visão da distribuição espacial das doenças.

Por meio do mapa de predição gerado na análise, o qual é de fácil interpretação, foi possível verificar que, para o período analisado, as áreas da periferia da área urbana de Porto Velho são as mais afetadas pela doença, especialmente as regiões sudoeste, nordeste, leste e noroeste, o que pode estar associado a diversos fatores, tais como características naturais da região, aspectos da urbanização local e problemas socioambientais.

A visão espacial da endemia na região pode ser uma ferramenta de gestão de saúde pública de importância significativa, uma vez que pode auxiliar no planejamento e execução de ações contra a proliferação da doença no espaço urbano.

Para trabalhos futuros, pretende-se refazer as análises com dados mais recentes na região, de forma a comparar os resultados com aqueles obtidos no presente estudo.

REFERÊNCIAS

1. Monteiro MR, Ribeiro MC, Fernandes SC. Aspectos clínicos e epidemiológicos da malária em um hospital universitário de Belém, Estado do Pará, Brasil. *Revista Pan-Amazônica de Saúde*. 2013; 4(2): 33-43.
2. Gomes AP, Vitorino RR, Costa AP, Mendonça EG, Oliveira MG, Siqueira-Batista R. Malária grave por *Plasmodium falciparum*. *Revista Brasileira de Terapia Intensiva*. 2011; 23(3): 358-369.
3. Rodrigues AD, Escobar AL, Souza-Santos R. Análise espacial e determinação de áreas para o controle da malária no Estado de Rondônia. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*. 2008; 41(1): 55-64.
4. Angelo JR, Katsuragawa TH, Sabroza PC, Carvalho LA, Silva LH, Nobre CA. The role of spatial mobility in malaria transmission in the Brazilian Amazon: The case of Porto Velho municipality, Rondônia, Brazil (2010-2012). *PLOS ONE*. 2017; 12(2): 1-12.
5. Silva AM, Silva RM, Almeida CA, Chaves JJ. Modelagem geoestatística dos casos de dengue e da variação termopluviométrica em João Pessoa, Brasil. *Sociedade & Natureza*. 2015; 27(1): 157-169.
6. Oliveira R, Grego C, Brandão Z (2015). *Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper*. Brasília: Embrapa; 2015.
7. Landim PMB. Sobre Geoestatística e mapas. *TERRÆ DIDÁTICA*. 2006; 2(1): 19-33.
8. Soares A. *Geoestatística para a ciência da terra e do ambiente*. Lisboa: IFT Press; 2006.
9. Camargo ECG (1998). *Geoestatística: Fundamento e Aplicações*. In: Camara G, Medeiros JS. *Geoprocessamento em Projetos Ambientais*. São José dos Campos: INPE, 1998. p. 36
10. Grego C, Oliveira R, Vieira S (2014). *Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão*. In: Bernardi ACC, Naime JM, Resende AV, Bassoi LH, Inamasu RY. *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Embrapa Instrumentação Agropecuária. Brasília: 2014. p. 74-83.

11. Simão F (2001). Mapeamento de risco de malária na área urbana de Porto Velho – RO, pela Krigagem indicativa [dissertação]. Rio Claro. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2001.
12. Kanegae Junior H, de Mello JM, S. Scolforo JR, de Oliveira, AD. Avaliação da continuidade espacial de características dendrométricas em diferentes idades de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. *Revista Árvore*. 2007; 31(5): 859-866.
13. Humada Gonzalez GG, Liska GR, Morais AR, Cirillo MA, Souza LM. Análise espacial do processo de restauração na região da usina. In: *Anais do IV Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias*; 2015. Botucatu.
14. Montebeller CA, Ceddia MB, DE Carvalho DF, Vieira SR, Franco EM (2007). Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no estado do Rio de Janeiro. *Engenharia Agrícola*. 2007; 27(2): 426-435.
15. R Core Team. (2020).