

Analysis and development of flooding risk model in the Metropolitan Region of Belém-PA

Sindy Samantha de Sousa Almeida*, Isaias de Oliveira Siqueira**, Joaquim Carlos Barbosa Queiroz***

* Graduanda em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará – UFPA. E-mail: sialmeteoro@gmail.com (autor correspondente).

** Graduando em Geologia pela Universidade Federal do Pará – UFPA. E-mail: isaias.siqueira@ufpa.br

*** Professor do Instituto de Geociências, UFPA – PA, Brasil. E-mail: joaquim@ufpa.br

Received 26 December 2023; accepted 30 December 2023

Abstract

Mapping of risk areas should be the first necessary analysis to guide the occupation of urban space as a preventive measure to minimize the impacts arising from flood-related events. The aim of this work was to analyze and map the flood hazard areas in the Metropolitan Region of Belém. The geostatistical interpolation tool by kriging and the variogram function were used for the process of spatial analysis of the altitude and rainfall variables. The risk threshold was created hypothetically, considering the result of the descriptive statistics of the predictive variables in the model, starting from the concept of map algebra. The dynamic distribution of risk levels over the months showed the seasonal variation in flood risk in the study area, where, the medium and high risks were the most frequent. This indicates that much of the study area faces significant flood risks, with the possibility of moderate to substantial damage. In the months considered within the most rainy period in the region the above-average risk levels are predominant, already in the less rainy season there is a decrease in the predominance of acute risk levels. This suggests that the rainy season contributes to the increased risk of flooding, the opposite occurs for the less rainy seasons. Although simple, the model was able to consistently demonstrate the flood risks in the study area, from two initial variables, and by adding more predictive parameters to the modeling, it can bring more significant results than the one obtained in this work.

Keywords: Map algebra, rainfall, topography, geostatistics, computer modeling.

Análise e desenvolvimento de modelo de risco de inundação na Região Metropolitana de Belém-PA

Resumo

O mapeamento das áreas de risco deveriam ser a primeira análise necessária para orientar a ocupação do espaço urbano como medida preventiva para minimizar os impactos decorrentes dos eventos relacionados a inundações. O objetivo deste trabalho foi analisar e mapear as áreas de risco de inundação na Região Metropolitana de Belém. Foi utilizada a ferramenta geoestatística de interpolação por krigagem e a função de variograma para o processo de análise espacial das variáveis altitude e precipitação. O limiar dos riscos foi criado de forma hipotética, considerando o resultado da estatística descritiva das variáveis preditoras no modelo, partindo do conceito acerca da álgebra de mapas. A distribuição dinâmica dos níveis de risco ao longo dos meses mostrou a variação sazonal no risco de inundação na área de estudo, onde, os riscos Médio e Alto foram os mais frequentes. Isso indica que grande parte da região de estudo enfrenta riscos significativos de inundações, com possibilidade de danos moderados a substanciais. Nos meses considerados dentro do período mais chuvoso na região os níveis de risco acima do médio são predominantes, já no período menos chuvoso há uma diminuição na predominância dos níveis de risco acentuados. Isso sugere que a temporada de chuvas contribui para aumentar os riscos de inundação, o contrário ocorre para a temporada menos chuvosa. Apesar de simples, o modelo conseguiu demonstrar de forma coerente os riscos de inundação área de estudo, partindo de duas variáveis iniciais, e ao acrescentar mais parâmetros preditores à modelagem, poderá trazer resultados mais significativos que o obtido neste trabalho.

Palavras-chave: Álgebra de mapas, precipitação, topografia, geoestatística, modelagem computacional.

1. Introdução

Na região tropical, observa-se uma notável variação temporal e espacial em variáveis meteorológicas essenciais, com destaque para a precipitação. Esse fenômeno complexo é influenciado

por diversos fatores e fenômenos meteorológicos de diferentes escalas (Rockwood; Maddox, 1998).

Estudos observacionais indicam a influência de padrões oceano-atmosfera de grande escala, como as anomalias da Temperatura da Superfície do Mar

(TSM) sobre o Oceano Atlântico Equatorial e o ciclo do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no Oceano Pacífico Equatorial (Souza *et al.*, 2000). Além de outros mecanismos tropicais de circulação oceano-atmosfera, como: Dipolo do Atlântico e a Oscilação de Madden-Julian em que, em cada fase oposta, há o favorecimento ou desfavorecimento de atividade convectiva na região que atua, segundo Madden e Julian (1994) e Souza e Ambrizzi (2006). A zona de confluência dos ventos alísios de nordeste e sudeste, associada às circulações térmicas diretas (Circulação de Hadley e Walker), é o principal sistema precipitante do outono austral na região norte e nordeste da Amazônia oriental, conhecida também como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), além da atuação de aglomerados convectivos estacionários que constituem a Zona de Convergência do Atlântico Sul e atingem a parte sul da Amazônia (Coelho *et al.*, 2004; Malhi *et al.*, 2002).

Na mesoescala, destacam-se as Linhas de Instabilidade (LI), as quais são conceituadas como tempestades multicelulares organizadas por aglomerado de células e que podem ser responsáveis por 45% do acumulado da precipitação na mesorregião do nordeste do estado do Pará (Cohen; Silva; Nobre, 1989). Além disso, o gradiente horizontal de pressão é influente na costa norte-nordeste do Brasil, resultando na circulação de brisa marítima gerada pelo contraste térmico diurno entre o continente e oceano adjacente.

Segundo Tucci e Bertoni (2003), a problemática relacionada às inundações é dita como consequência da visão distorcida do controle dos profissionais que priorizam projetos localizados sem uma visão do apanhado hidrológico da bacia e dos aspectos sociais e institucionais das cidades. A paisagem urbana está intrinsecamente ligada à dinâmica hidrológica. À medida que as áreas urbanas se expandem, há um aumento significativo na impermeabilização do solo e na expansão das redes de drenagem artificiais. Isso resulta em alterações no fluxo de água, levando a um influxo adicional de água e poluentes nos sistemas naturais.

De acordo com Marcelino (2008), o risco é uma maneira de mensurar a probabilidade de um perigo transformar-se em um desastre, e quando se aumenta a frequência do perigo e a intensidade da vulnerabilidade em um sistema humano, tem-se como consequência o alto risco de um perigo tornar-se desastre.

A Região Metropolitana de Belém (RMB) faz parte da Zona Costeira do Estado do Pará (ZCPA) e segundo Mendes *et al.* (2001), é identificada como um dos municípios em que é descrita a ameaça, vulnerabilidade, e impactos de desastres e avaliação de

riscos geohidrológicos, como a inundação. Além disso, a crescente urbanização sem planejamento adequado, em um relevo típico de várzea (também conhecido como planície de inundação), leva à maior vulnerabilidade do risco na região

A Lei Federal nº 12.608, de 10 de abril de 2012, institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e traz um forte apelo às ações de prevenção aos desastres deflagrados por eventos naturais a partir de medidas estruturantes, destacando-se entre elas o mapeamento de áreas de risco. A utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE) é recorrente nestes estudos, a partir da transformação das medidas altimétricas em mapas de relevo. O MDE pode ser combinado com outras variáveis, como dados de maré, mostrando que as áreas de baixadas são mais suscetíveis ao risco de inundação (Sadeck *et al.*, 2012; Santos; Rocha, 2014; Vieira *et al.*, 2022).

De acordo com Bayissa *et al.* (2017), A compreensão do risco de inundação demanda análises temporais e espaciais aprimoradas, ressaltando a escassez de informações meteorológicas na região norte do Brasil. A utilização de produtos de sensores orbitais e a aplicação de ferramentas como a geoestatística, especialmente a Krigagem, são fundamentais para representar a precipitação em áreas sem disponibilidade de dados de superfície, contribuindo para uma avaliação mais abrangente do risco de inundação nesta região, além de que, ao levar em conta a distribuição geográfica das variáveis, possibilita a compreensão mais profunda das relações espaciais entre as amostras de dados (Fletcher; Andrieu; Hamel, 2013).

Neste contexto, esta pesquisa buscou mostrar a eficiência da assimilação de ferramentas da geoestatística por meio de produtos de sensoriamento remoto e características físicas da região, associado à modelagem e mapeamento do risco de inundação na RMB, visando a expansão de metodologias acerca da temática, com o objetivo de ampliar os estudos na região com base nos resultados obtidos.

2. Área de estudo

A área de estudo está inserida na RMB (Figura 1) e tem uma população estimada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2019, de 2.505.242 habitantes, abrangendo um total de 8 municípios, sendo eles: Ananindeua, Barcarena, Belém, Benevides, Castanhal, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Santa Isabel do Pará. No presente trabalho, não foram utilizados os municípios: Castanhal, Santa Isabel do Pará e Barcarena, para

melhor análise e tempo de resposta da metodologia a ser empregada.

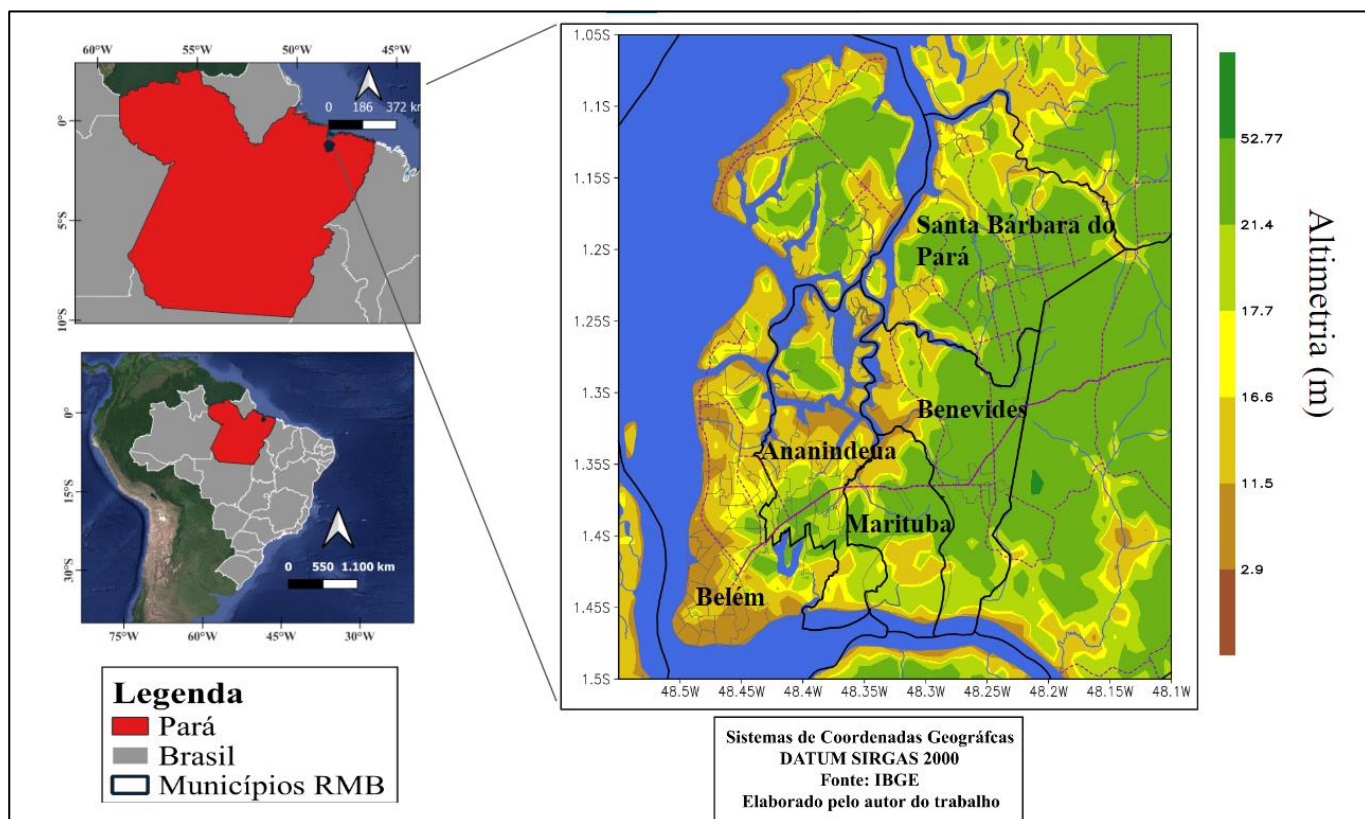


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo e topografia local, com foco nos municípios de Ananindeua, Belém, Benevides, Marituba e Santa Bárbara do Pará.

A taxa de crescimento significativa, ou seja, maior que 60%, na qual o município de Belém detém maior população urbana, sendo 1.381.475 habitantes, e a região que tem o menor número é Santa Bárbara do Pará com aproximadamente 1,24% da população de Belém, segundo Carmo e Costa (2017). A capital do estado, Belém, é banhada pelo rio Guamá e pela baía do Guajará, e segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é considerada a capital mais chuvosa do Brasil, apresentando índice pluviométrico de 2921,9 mm.Ano⁻¹.

A influência direta da floresta amazônica, de seus rios e sua proximidade com o oceano atlântico faz com que haja predominantes episódios de precipitação, tendo configurado uma estação chuvosa (janeiro a maio) e a estação menos chuvosa (julho a novembro), e os meses de junho e dezembro sendo caracterizados como a transição de um período e outro, como descrito por Souza *et al.* (2017).

Em Belém, as causas dos episódios de inundação provêm de intensos eventos de precipitação, além do relevo marcado por platôs amazônicos e planícies litorâneas, com elevação variando entre 0 a 55 metros de altitude. A ação integrada desses fatores iniciais coloca a região em uma situação de vulnerabilidade às enchentes e

inundação, como visto nos trabalhos de Gille e Mota (2014).

A partir de estudos sobre o conceito de hidroterritórios aplicados para a RMB, Lima *et al.* (2021) constataram que pode ser aplicado tal dinâmica, servindo de utilidade ao zoneamento voltado para a análise do processo de expansão e conexão de áreas urbanas, onde variáveis como pluviometria e altimetria foram fundamentais indicadores de comportamento nas regiões mais afetadas: Benevides e Marituba, no qual predominam as formas de uso da terra sobre os sistemas hídricos da região.

3. Metodologia

No âmbito da pesquisa, os procedimentos para a obtenção, tratamento e processamento das variáveis utilizadas para o mapeamento do risco de inundação na RMB são abordados na Figura 2, contidos no fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.

Baseado na literatura, foi utilizado duas variáveis: altitude e precipitação, como preditores geoespaciais, sendo os fatores condicionantes para o

modelo (variáveis independentes) relacionados à inundação, segundo Ouma e Tateishi (2014). Após a demarcação da área de estudo, foi feita a extração da altitude do MDE, referente aos cinco municípios da RMB e em formato *shapefile*, a partir da missão espacial denominada *Shuttle Radar Topography*

Mission (SRTM), conduzida pelo órgão norte-americano *United States Geological Survey* (USGS). A resolução espacial deste MDE possui margens de erro não superiores a 20 metros, como relatado por Vital *et al.* (2010).

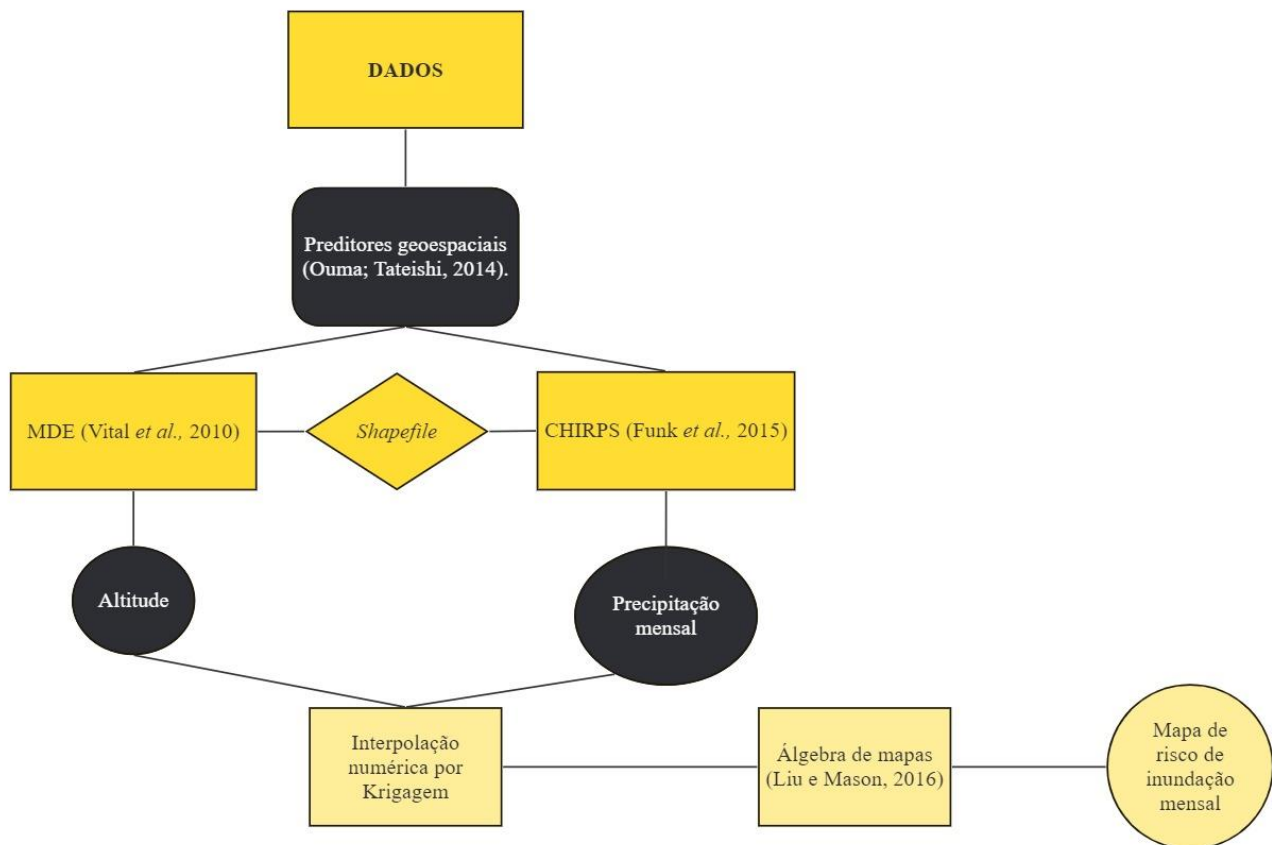


Figura 2 - Fluxograma para a obtenção das variáveis utilizadas no mapeamento do risco de inundação na RMB.

Para estimar os padrões de precipitação na nossa área de estudo, foram utilizados dados mensais a partir de uma série temporal de 16 anos (2003 a 2019), provenientes do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS). Este conjunto de dados abrange informações de precipitação em diferentes escalas temporais, incluindo séries diárias, pentadais e mensais, e possui uma notável resolução espacial de 0,05°. Essa fonte de dados, conforme documentado por Funk *et al.* (2015), oferece uma base sólida para a análise das condições pluviométricas na RMB ao longo desse período estendido, além de ser um produto resultante de dados de precipitação por satélite e de estações meteorológicas de superfície, a partir da interpolação espacial da região, abrangendo áreas onde não se tem estações meteorológicas de superfície ao longo da extensão territorial da área de estudo.

Estas variáveis foram arranjadas em grid (malha) no formato de polígonos (*shapefile*) e manipulados em ambiente de programação R, onde foi feita a reamostragem dos pixels dos arquivos e

organizados em 10.000 pontos. A razão do detalhamento em menor grid foi devido ao fato de que, para a simulação do modelo estatístico, é necessário buscar o equilíbrio entre a precisão, dispersão de dados e esforço computacional.

Para o mapeamento das variáveis com uso da geoestatística, foi utilizado o método de interpolação por Krigagem, onde, para os valores não amostrados por esse método, foi aplicado a ferramenta denominada variograma, em que é um modelo que mede e descreve a dependência espacial entre as amostras e a interpolação por krigagem, com o objetivo de compor uma superfície suavizada. Os conceitos acerca da aplicação da geoestatística podem ser encontrados em trabalhos científicos como Deustch (2002), porém, com mapas no formato raster. Para aplicação dos locais associados à delimitação por polígonos, foi utilizado a estatística espacial, no qual o índice de Moran é bastante utilizado no modelamento da estrutura de correlação espacial dos dados (Druck *et al.*, 2004). Após isso, foi utilizado o conceito de álgebra de mapas definida por Liu e

Manson (2016), com as variáveis preditoras já organizadas na mesma malha e com o propósito de fazer a análise da dependência espacial de cada pixel sobreposto. Para realizar operações algébricas, mais precisamente, operações dentro do domínio da álgebra de mapas, entre os conjuntos de informações de altitudes e precipitações, foi fundamental que esses dados compartilhassem de um sistema de coordenadas geográficas idênticas, ou seja, que estejam georreferenciados de maneira que as coordenadas de latitude e longitude correspondam perfeitamente. Esse alinhamento é essencial para garantir a coerência e a precisão dos cálculos e análises subsequentes.

4. Resultados e discussão

A partir da utilização do método de krigagem, com o intuito de estimar os valores altimétricos associados aos pontos de amostragem previamente estabelecidos no conjunto de dados de precipitações, a Figura 3 apresenta tanto o semivariograma

experimental, que se baseia nas amostras reais coletadas no terreno, quanto o modelo espacial ajustado especificamente para facilitar o processo de interpolação por meio da técnica de Krigagem. Para o modelo teórico ajustado aos dados utilizados de altitude e precipitação estimada mensal, foi feita a combinação de estruturas esféricas (Sph) com descrição matemática precisa das amostras de dados utilizados, com diferentes alcances (0,03 e h/0.2), amplitudes (42 e 28) e valor base inicial igual a 10, possível quando a distância é zero, possibilitando uma análise do risco de inundação mais confiável. Deste modo, o modelo esférico de semivariograma forneceu uma representação espacial da variabilidade dos dados, permitindo a identificação de padrões e estruturas espaciais presentes, com o objetivo de compor uma superfície suavizada entre as variáveis altitude e precipitação mensal, sendo essencial para a análise de interpolação por krigagem, ajudando a prever valores em locais não amostrados com base na dependência observada.

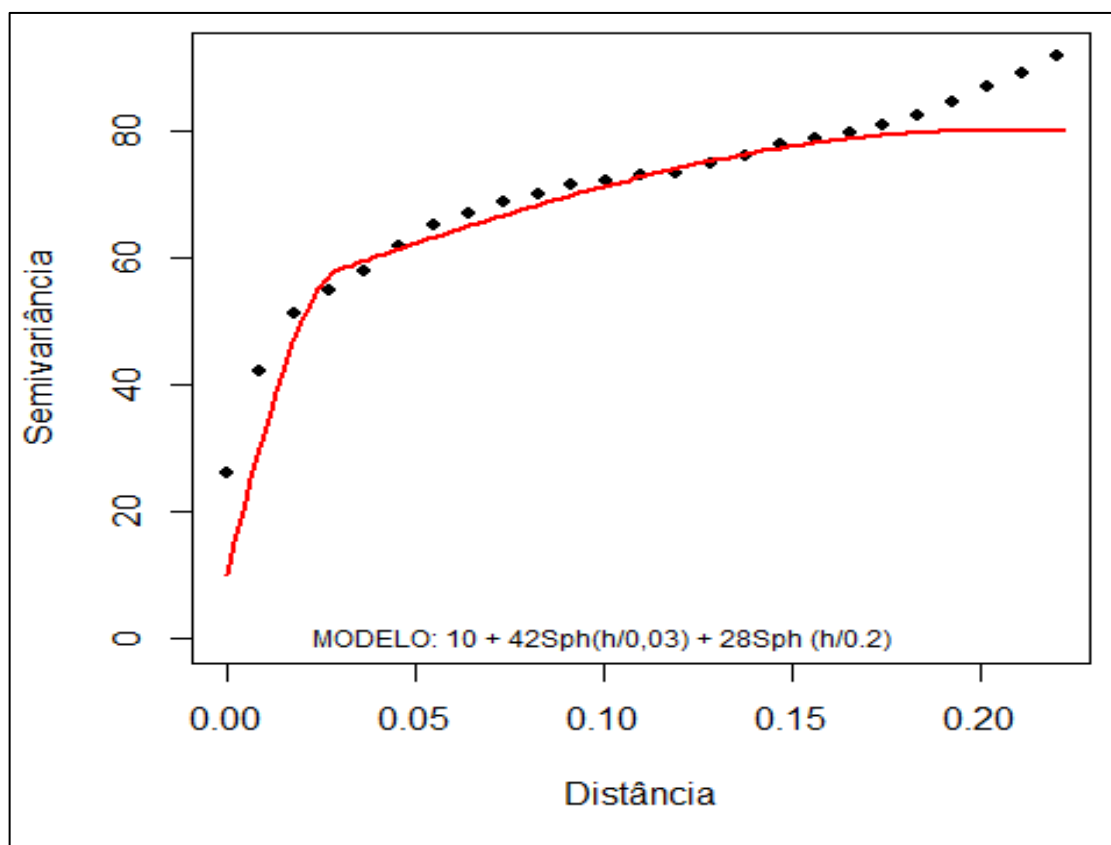


Figura 3 - Modelo semivariograma esférico ajustado, entre a altitude e precipitação estimada mensal.

A Tabela 1 desempenha um papel crucial na representação e análise dos resultados obtidos nesta pesquisa, oferecendo uma visão abrangente tanto da distribuição espacial das amostras coletadas quanto dos dados resultantes da aplicação da técnica de krigagem, uma ferramenta poderosa na área da

geoestatística. Também, serve como um recurso informativo essencial que ajuda a consolidar e comunicar os resultados desta pesquisa, oferecendo uma visão completa das características espaciais e estatísticas das variáveis em questão, bem como das

estimativas geradas por meio da técnica de interpolação.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas do resultado entre as amostras espaciais e a interpolação por Krigagem.

	Mínimo	1° Quartil	Mediana	Média	3° Quartil	Máximo
Amostras	1.00	14.00	18.00	19.81	25.00	71.00
Krigagem	2.87	13.6	17.7	19.2	23.47	52.77

Fonte: Autores (2023).

Conforme destacado por Cressie (1993), a proximidade notável entre os valores estatísticos empregados na análise de dados espaciais sugere fortemente sua eficácia e confiabilidade. No caso específico deste estudo, a avaliação das estatísticas descritivas principais, que englobam a média, a mediana e os quartis do conjunto de dados em questão, revela uma notável proximidade entre esses indicadores. Essa consistência espacial dos dados sugere que as informações capturadas refletem de maneira coerente as variações reais que ocorrem na

área de estudo. Além disso, essa consistência estatística permite a estimativa precisa de valores intermediários, contribuindo para uma análise espacial robusta e fundamentada, como é visto na Tabela 1.

A Tabela 2 mostra o resultado da estatística descritiva do banco de dados de precipitação mensal e altitude extraída do MDE. Essas informações foram utilizadas para a criação do limiar hipotético do risco de inundação mensal, de modo que haja coerência com as condições topográficas e meteorológicas da região, além de buscar significância estatística

Tabela 2 - Estatísticas descritivas de precipitação mensal e altitudes na RMB

Variável	Mínimo	1° Quartil	Mediana	Média	3° Quartil	Máximo
Precipitação mensal (mm)	43.28	125.97	197.47	242.59	365.36	498.06
Altitude (m)	2.87	11.49	16.61	17.69	21.38	52.77

Fonte: Autores (2023).

O Quadro 1 mostra os quatro níveis de risco, nomeadamente: Baixo, Médio, Alto e Muito Alto, com o intuito de avaliar e classificar os riscos associados a

diferentes condições geográficas. A lógica subjacente a essa classificação se baseou na análise da altitude local e na precipitação pluviométrica.

Quadro 1. Ensaio das faixas de risco (limiar hipotético) de inundação para a RMB.

Riscos	Altitude (m)	Precipitação (mm)
Baixo	≥ 21	< 125
Médio	< 21 e ≥ 16	≥ 125 e < 242
Alto	< 16 e ≥ 11	≥ 242 e < 365
Muito Alto	< 11	> 365

Fonte: Autores (2023).

Observou-se que, em geral, as áreas com maiores altitudes e menores níveis de precipitação apresentaram riscos mais baixos. Por outro lado, à medida que a altitude diminui e a precipitação aumenta, os riscos tendem a aumentar. Para determinar os limiares de risco, recorreu-se à análise dos quartis e da mediana dos dados de altitude. O terceiro quartil dos valores de altitude foi escolhido como limiar para os riscos considerados baixos e médios. À medida que o risco aumenta, os limiares foram ajustados para incluir valores iguais ou inferiores ao primeiro quartil e inferiores à mediana da variável de altitude. Essa adaptação na definição dos limiares resultou na classificação de riscos maiores e

menores, conforme a altitude local se encontra abaixo de 11 metros ou acima de 21 metros, respectivamente.

No que diz respeito à precipitação, os riscos baixo e médio, foram considerados valores maiores ou iguais ao primeiro quartil e menores que a média, respectivamente. Já para os riscos alto e muito alto, os limiares foram estabelecidos com base em valores superiores à média e inferiores ao terceiro quartil da precipitação. Consequentemente, quando o volume de precipitação variava de menos de 125 mm a mais de 365 mm, os níveis de risco eram categorizados de baixo a muito alto, refletindo a ampla gama de condições climáticas e topográficas presentes na região de estudo.

A análise da distribuição do nível de risco de inundação foi feita por regimes de chuva característicos da RMB. A Figura 4 mostra esta

dinâmica no Período Chuvoso (PC) e com o limiar dos riscos aplicados para os 5 municípios utilizados.

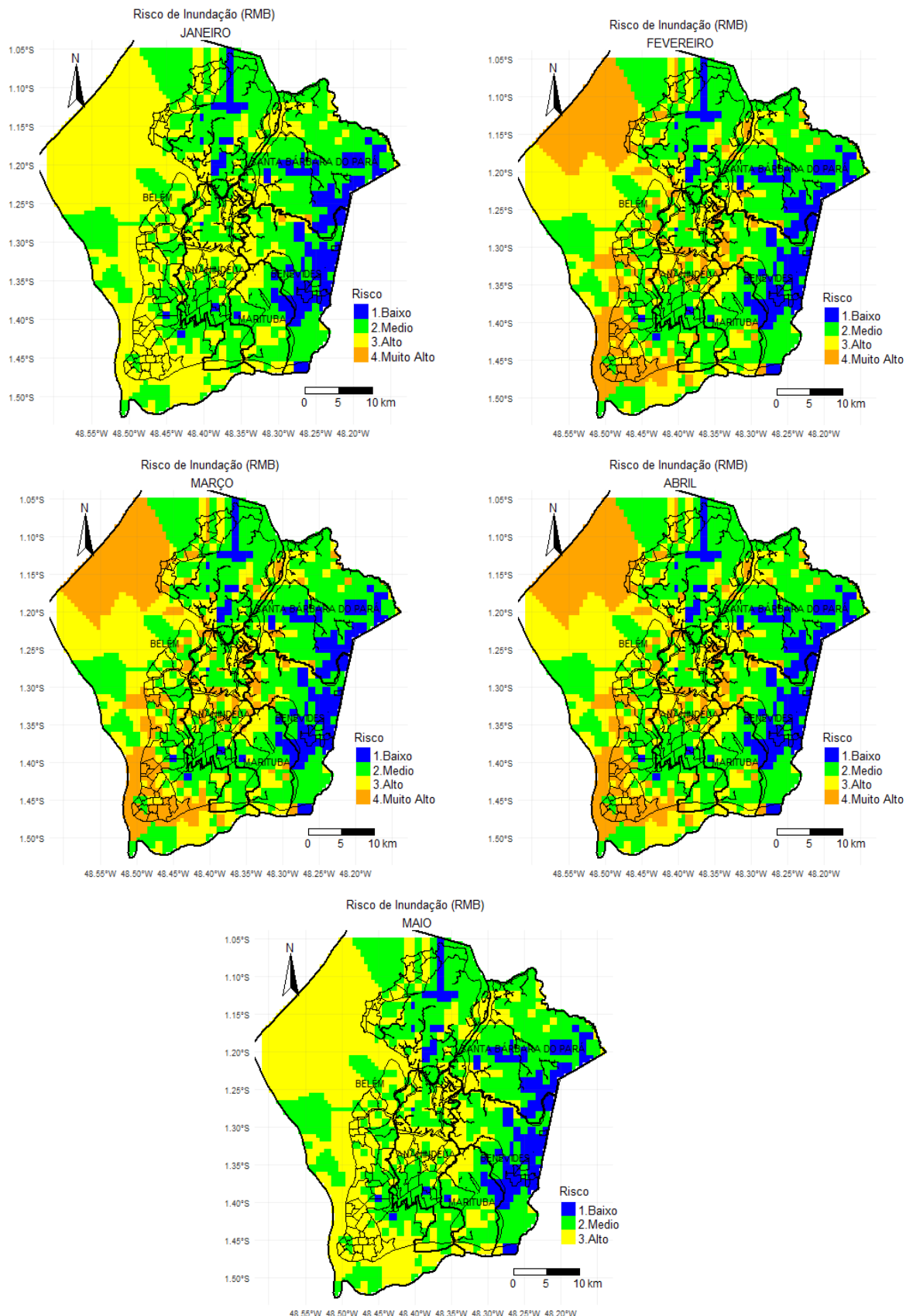


Figura 4. Mapas de risco de inundação para o PC da RMB.

Observa-se que os meses com riscos mais críticos estão concentrados no PC, mais precisamente no trimestre consecutivo de fevereiro a abril, na região sul do município de Belém. Entretanto, a porção sudeste de Santa Bárbara do Pará e leste de Benevides prevalece com o menor risco, isso se deve ao fato de a amplitude da altitude entre as três localidades ser bem acentuada e a concentração do relevo de várzea é predominante na faixa mais litorânea da RMB. Durante a análise, foi visto que há uma interação entre a dinâmica dos locais com maiores e menores altitudes. Os maiores níveis de risco de inundação são vistos principalmente na região central de Ananindeua e sul de Belém. Isso se deve ao fato de que as duas regiões são caracterizadas com menores altitudes, basicamente na área de planície da bacia que o circunda, no caso de Belém, segundo Cristo e Luz (2014).

A Figura 5 representa o risco de inundação para os meses de junho e dezembro, considerado como

Período de Transição (PT), e mostrou-se coerente o significado da denominação deste regime a partir do padrão climatológico de precipitação da RMB. O risco médio para eventos de inundação também pôde ser entendido como a transição entre os dois regimes de extremos pluviométricos. A região litorânea ainda tem influência do risco médio, já a porção mais continental apresenta o risco mais baixo. No mês de dezembro foi possível observar o início do aumento no limiar da região sul (litorânea) de Marituba, dando a entender que, à medida que a transição entre um regime pluviométrico e outro diminui, a faixa litorânea tende a apresentar maior risco de inundação, conforme o padrão de aquecimento do continente começa a ter maior influência na dinâmica da atividade convectiva na região, sendo o mês de dezembro marcado pelo início do equinócio de verão.

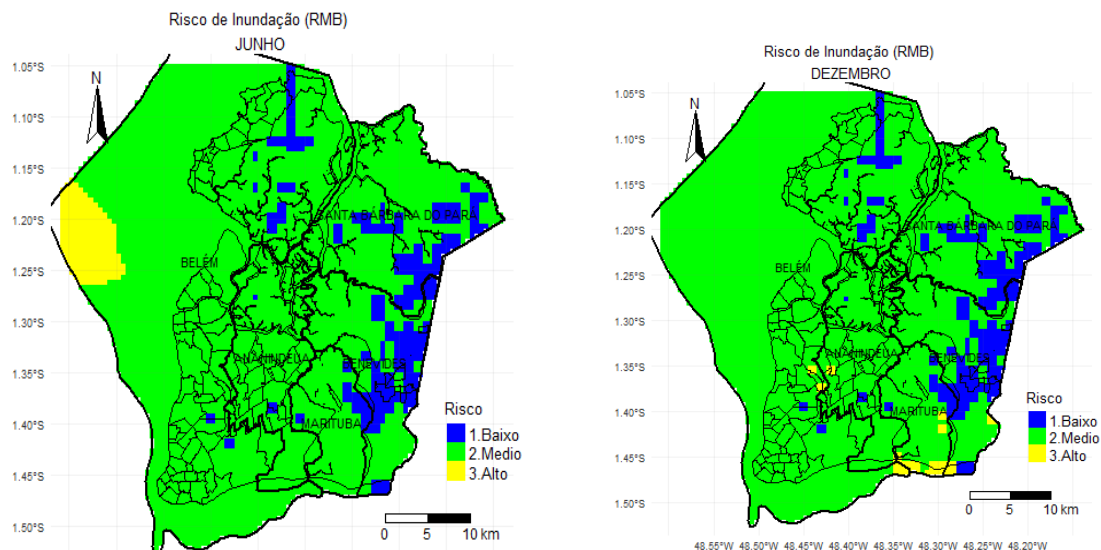


Figura 5. Mapas de risco de inundação para o PT na RMB.

A figura 6 apresenta os limiares de risco de inundação para o Período Menos Chuvoso (PMC), e é notável que o limiar de risco não ultrapassa o nível médio, mesmo em áreas onde altitudes menores foram observadas anteriormente. Vale ressaltar que a região leste da RMB se destaca por suas altitudes mais elevadas em comparação com outras áreas. Como resultado, os municípios de Santa Bárbara do Pará e Benevides permanecem em um estado de risco baixo de inundação, devido às suas características topográficas favoráveis que os tornam menos suscetíveis a eventos de inundação.

Os meses dentro do PMC mostraram o predomínio do risco baixo e médio de inundação, mesmo nos locais nos quais há maior amplitude

topográfica. O trimestre de setembro a novembro apresenta o menor limiar em todos os municípios, e a maior parte dos sistemas precipitantes concentram-se na mesoescala, com pancadas de chuva consideráveis e com menor duração em relação ao PC. Isso se deve ao fato de que, o padrão sinótico do PMC não leva em consideração a atuação da ZCIT, climatologicamente, e devido ao seu deslocamento latitudinal do hemisfério norte para o hemisfério sul, ser característico dos meses de verão e outono austral, ou seja, dos meses considerados como PC. Desse modo, a influência de maiores acumulados de precipitação é consideravelmente menor no PMC, e consequentemente, o risco de inundação tende a ser menor, com o limiar médio de risco predominante.

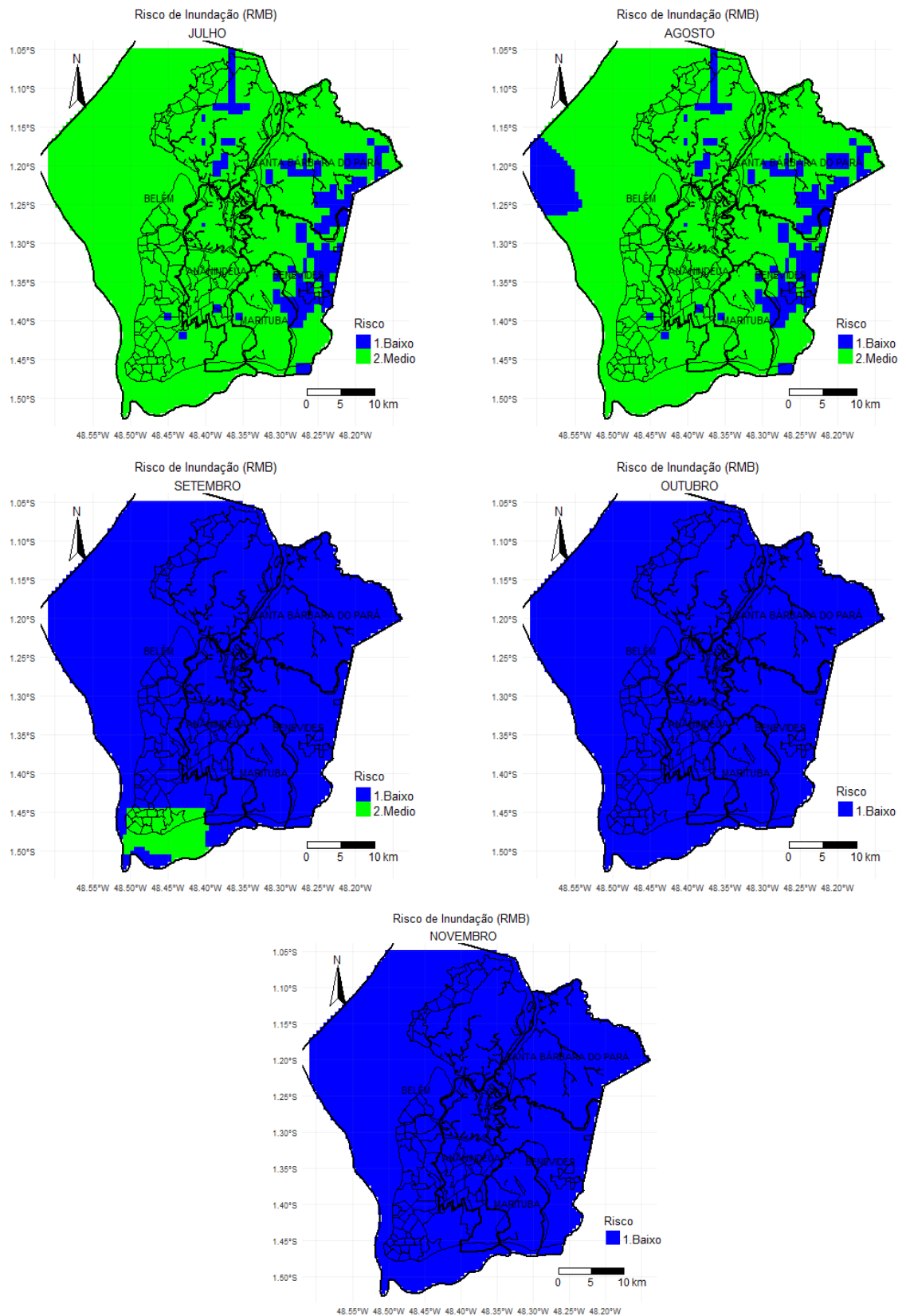


Figura 6. Mapas de risco de inundação para o PMC da RMB.

A utilização do produto de precipitação por satélite mostrou a dinâmica espacial dos limiares de riscos hipotéticos associados à inundação. A Tabela 3 mostra de forma quantitativa e percentual os locais de cada pixel associado à resolução de aproximadamente 5 km do CHIRPS. Ao passo que o limiar mudava sazonalmente entre cada regime pluviométrico caracterizado, foram observados valores iguais da quantidade de locais, e consequentemente, do percentual em cada limite de risco, sendo considerado até valores nulos. Isto pode ser

associado ao efeito da resolução espacial deste produto interferindo e modelando a outra variável associada ao modelo geoestatístico. Entretanto, sua coerência quanto à caracterização dos limiares e a climatologia da precipitação na região é relevante, visto que os maiores percentuais de riscos extremos de inundação concentram-se no PC, e o contrário é observado no PMC, principalmente no trimestre de setembro a novembro, além dos maiores percentuais do limiar transiente serem caracterizados no PT.

Tabela 3. Quantidade e percentuais de locais com risco de inundação mensal na RMB. Fonte: Autores (2023).

Risco	1. Baixo (%)	2. Médio (%)	3. Alto (%)	4. Muito Alto (%)
Janeiro	505 (8.69)	2563 (44.08)	2738 (47.09)	8 (0.14)
Fevereiro	505 (8.69)	2563 (44.08)	1613 (27.74)	1133 (19.49)
Março	505 (8.69)	2563 (44.08)	1563 (26.88)	1133 (19.49)
Abril	505 (8.69)	2563 (44.08)	1563 (26.88)	1133 (19.49)
Maio	505 (8.69)	2563 (44.08)	2746 (47.23)	0
Junho	505 (8.69)	2563 (44.08)	196 (3.37)	0
Julho	505 (8.69)	5309 (91.31)	0	0
Agosto	701 (12.06)	5113 (87.94)	0	0
Setembro	5553 (95.51)	261 (4.49)	0	0
Outubro	5814 (100)	0	0	0
Novembro	5814 (100)	0	0	0
Dezembro	505 (8.69)	5246 (90.23)	63 (1.08)	0

A distribuição dinâmica dos níveis de risco ao longo dos meses fornece uma visão geral das variações sazonais no risco de inundações na RMB, sendo os níveis de risco médio e alto os mais consistentes e frequentes ao longo do ano. Isso indica que grande parte da RMB enfrenta riscos significativos de inundações, com a possibilidade de danos moderados a substanciais. Além de que, nos meses considerados dentro do período mais chuvoso na região (janeiro a maio) os níveis de risco acima do médio são predominantes, já no período menos chuvoso (julho a novembro) há predominância do risco Baixo. Isso sugere que a temporada de chuvas contribui para aumentar os riscos de inundação, o contrário ocorre para a temporada menos chuvosa.

5. Conclusões

Por meio deste estudo foi possível perceber que, a partir dos métodos geoestatísticos aplicados às variáveis de topografia e precipitação estimada para a RMB, pode-se afirmar que a modelagem quantitativa e qualitativa do risco de inundação foi coerente com padrão climatológico da região, visto que, mesmo utilizando uma série de dados de 16 anos, foi possível relacionar a condição observacional das inundações sazonais em relação às características topográficas distintas entre os 5 municípios utilizados.

O sul do município de Belém demonstrou valores de riscos médios a altos em praticamente todos os meses do ano, com destaque para o PC, relacionado à sua condição de relevo local. Já a porção leste de Benevides e sudeste de Santa Bárbara do Pará, apresentam riscos baixos mesmo no período considerado com maior risco de inundação em relação à toda a área de estudo utilizada. Os trimestres com associados com o maior quantitativo de pontos de inundação e limiar de risco Muito Alto ocorrem de fevereiro a abril na RMB.

Para sugestão de trabalhos futuros, a inserção de novas variáveis como declividade, uso e cobertura do solo, dados de rede de drenagem, associado com as ferramentas estatísticas utilizadas, e adicionando métodos de inteligência artificial como a lógica fuzzy, por exemplo, pois possibilita traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa (Zadeh, 1965) e pode ser aplicada em variáveis complexas como a precipitação (Vieira *et al.*, 2014), podendo aprimorar o modelo estatístico, de modo que contribua para a tomada de decisão relacionada a medidas preventivas e de respostas determinadas a partir do ensaio das variáveis inseridas no modelo, permitindo que diferentes estratégias sejam avaliadas com base em múltiplos critérios de maneira mais flexível e intuitiva.

Agradecimentos

À Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP - UFPA) pelo financiamento dado para o desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- Bayissa, Y., Tadesse, T., Demisse, G., Shiferaw, A., 2017. Evaluation of satellite-based rainfall estimates and application to monitor meteorological drought for the upper blue Nile basin, Ethiopia. *Remote Sensing* 9, e669.
- Brasil. Lei nº. 12.608, de 10 de abril de 2012. Autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastre. Brasília, DF: Presidência da República, 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12608.htm. Acesso em: 29 set. 2023.
- Carmo, M. B. S., Costa, S. M. F. A., 2017. Expressão Metropolitana de Belém: ainda há a Cidade Primaz?, In: 17º ENAPUR. Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional, p. 1-18.
- Coelho, M. S. Gan, M. A.; Conforte, J. C., 2004. Estudo da variabilidade da posição e da nebulosidade associada à ZCIT do Atlântico, durante a estação chuvosa de 1998 e 1999 no nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 19, p. 23-34.
- Cohen, J. C. P., Silva Dias, M.A.F., Nobre, C., 1989. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia. *Climanálise* 4, p. 34-40.
- Cressie, N.A.C., 1993. *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York
- Deustch, C.V., 2002. *Geostatistical Reservoir Modeling*. Oxford University Press, Oxford.
- Druck, S., Carvalho, M. S., Câmara, G., Monteiro, A.V. M., 2004. *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Embrapa, Brasília.
- Cristo, L. A., Luz, L. M., 2014. Morfologia e uso do solo na Bacia do Tucunduba, Belém/PA. *Revista Brasileira de Geografia Física* 7, p. 466-475.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfield, M., Pedreros, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2, p. 1-21.
- Fletcher, T. D., Andrieu, H., Hamel, P., 2013. Understanding, management and modeling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of art. *Advances in Water Resources* 51, p. 261-279.
- Gille, F. S. S., Mota, M. A. S., 2014. Importância das condições termodinâmicas nos eventos extremos

- de precipitação na cidade de Belém região metropolitana. *Revista Brasileira de Meteorologia* 29 (esp.), p. 73-82.
- INMET, 1992. Normais Climatológicas (1961-1990), INMET, Brasília.
- Lima A. M. M., Ferreira, N. S., Silva, M. V. S., Costa, A. M. S., 2021. Dinâmica do hidroterritório da Região Metropolitana de Belém (PA). *Research, Society and Development* 10, p. 1-19.
- Liu, J. G., Mason, P. J., 2016. Image processing and GIS for remote sensing: Techniques and applications. Wiley-Blackwell, New Jersey.
- Macêdo, R. J. A., Surya, L., 2018. Comparação entre modelos digitais de elevação dos sensores SRTM e Alos Palsar para análise digital de terreno. *Revista Contexto Geográfico* 3, p. 47-55.
- Madden, R., Julian, P., 1994. Observations of the 40-50 day tropical oscillation. *Monthly Weather Review* 122, p. 814-837.
- Malhi, Y., Pegoraro, E., Nobre, A. D., Pereira, M. G. P., Grace, J., Culf, A. D., Clement, R., 2002. Energy and water dynamics of central Amazonian rainforest. *Journal of Geophysical Research* 107, LBA-45.
- Marcelino, E. V., 2008. (ed.). Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos. Caderno Didático, Santa Maria-RS 1, p. 1-40, (INPE-15208-PUD/193).
- Mendes, A. C.; Silva, M. S., Santos, V. F., 2001. Análise do meio físico para gestão ambiental das ilhas de Algodoal e Atalaia (NE do Pará). In: PROST, M.; MENDES, A. (org.). *Ecossistemas costeiros: impactos e gestão ambiental*. TrêsC, Belém, pp. 103-111.
- Ouma, Y. O.; Tateishi, R., 2014. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water* 6, p. 1515–1545.
- Rockwood, A. A., Maddox, R. A., 1988. Mesoscale and synoptic scale interactions leading to intense convection: the case of 7 June 1982. *Weather and Forecasting* 3, p. 51-68.
- Souza, E. B. *et al.*, 2000. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. *Acta Amazônica* 30, p. 305-318.
- Souza, E. B. *et al.*, 2017. Padrões climatológicos e tendências de precipitação nos regimes chuvosos e seco na Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Climatologia* 21, p. 81-91.
- Sadeck, L. W. R., Souza, A. A. A., Silva, L. C. T., 2012. Mapeamento das Zonas de Risco às Inundações no Município de Belém-PA. In: Encontro nacional da anppas, 6., 2012, Belém-Pa. *Anais[...]*. Belém-Pa, p. 1-11.
- Tucci, C. E. M., Bertoni, J. C., 2003. Inundações urbanas na América do Sul. ABRH, Porto Alegre.
- Vieira, M. R. S., Vinagre, M., Valério, A., Lobo, M. A. A., Lima, A. C. M., Ponte, M. J. M., 2022. Mapeamento de áreas de risco a inundações com imagens alos palsar: estudo de caso em Belém (PA). *Acta Geográfica* 16, p. 47-63.
- Vital, S. R. O., Silveira, T. A., Alencar, H. M. Q., Ferreira, B., 2010. Uso de imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para o mapeamento geomorfológico na microbacia do açude Taperoá ii, Paraíba, Brasil. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife- PE, p. 01-05.
- Vieira, S. O., Oliveira, N. V., Satyamurty, P., Andreoli, R.V., 2014. Aplicação do método fuzzy na classificação da zona de convergência do atlântico sul no Sul da Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia* 29, p. 621 – 631