

MODELAGEM DA SUSCEPTIBILIDADE A INUNDAÇÃO E ALAGAMENTOS ATRAVÉS DO MODELO ADITIVO GENERALIZADO ESPACIAL

Allan Henrique Lima Freire¹, Camilo Daleles Renno¹, Silvana Amaral¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Divisão de Observação da Terra e Geoinformática - DIOTG, allan.freire@inpe.br, camilo.renno@inpe.br, silvana.amaral@inpe.br

RESUMO

Todos os anos, inundações e alagamentos causam prejuízos materiais e vítimas nas cidades brasileiras. Este trabalho analisa a suscetibilidade a inundações e alagamentos urbanos aplicando um modelo aditivo generalizado baseado em processos pontuais espaciais (SPGAM - *Spatial Generalized Additive Models*). Estudando a região norte de Vila Velha – ES, o modelo inclui como condicionantes físicos da suscetibilidade: declividade, elevação e orientação de vertentes, distância à rede de drenagem, e índices espectrais de superfícies impermeáveis. Como resultado, além das variáveis significativas para o modelo, apresenta-se um mapa com contornos de tolerância, evidenciando níveis de probabilidade à ocorrência dos eventos. O modelo apresenta-se como uma ferramenta útil para indicar áreas críticas à ocorrência destes eventos, e pode contribuir para planejamento e tomadas de decisões que visem minimizar os impactos das inundações e alagamentos nas cidades.

Palavras-chave – suscetibilidade, inundação e alagamento, modelo aditivo generalizado espacial, processos pontuais espaciais.

ABSTRACT

Every year, floods and inundation cause material damages and victims in Brazilian cities. This paper analyzes the susceptibility to urban floods and flooding by applying a generalized additive model based on spatial point processes (SPGAM - Spatial Generalized Additive Models). Studying the northern region of Vila Velha - ES, the model includes as physical conditioning factors of susceptibility: slope, elevation and orientation of slopes, distance to the drainage network, and spectral indices of impervious surfaces. As a result, in addition to the significant variables for the model, a map with tolerance contours is presented, showing probability levels for the occurrence of events. The model presents itself as a useful tool for indicating critical areas for the occurrence of these events, and can contribute to planning and decision-making aimed at minimizing the impacts of flooding and inundation in cities.

Key words – Susceptibility, flooding and inundation, spatial generalized additive model, spatial point processes.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Codificação Brasileira de Desastres [1], as inundações e alagamentos urbanos são classificados como

desastres naturais hidrológicos. Estes eventos atingem milhões de pessoas todos os anos. Dados do EM-DAT [2], registraram, apenas na América do Sul, 270 ocorrências de inundação entre os anos de 2001 e 2018. Neste período, 28,3 milhões de pessoas foram prejudicadas, houveram 6,4 mil mortes, e estimou-se um prejuízo financeiro de aproximadamente 21 bilhões de dólares.

As condições geomorfológicas e a morfologia das bacias hidrográficas são alguns dos principais fatores a serem considerados para estudos de suscetibilidade e impactos provocados pelas inundações e alagamentos nas cidades [3]. Porém, esses eventos estão sendo amplificados por: aumento dos eventos hidrometeorológicos extremos (chuvas) resultantes das mudanças climáticas [4]; pela falta de planejamento integrado do território urbano a partir do recorte da bacia hidrográfica, lugar onde ocorrem de forma latente as relações sociedade-natureza [5]; e pelas modificações da dinâmica natural hidrológica [6].

Alguns modelos estatísticos, que utilizam como base a análise de regressão, têm se mostrado eficientes para medir quantitativamente as probabilidades da ocorrência de inundações e alagamentos [7]. Esses modelos pressupõem que novas ocorrências do fenômeno investigado são baseadas em fatores condicionantes semelhantes de eventos anteriores. Entre as diferentes possibilidades, o modelo aditivo generalizado baseado em processos pontuais espaciais - SPGAM - *Spatial Generalized Additive Models* se destaca por ser uma técnica flexível e efetiva para a modelagem das relações não lineares entre a variável resposta e as variáveis explicativas [8].

Diante deste contexto, este artigo tem por objetivo modelar a suscetibilidade à inundação e alagamentos considerando os condicionantes físicos do espaço geográfico em um modelo de regressão espacial. Para isso, a região norte do município de Vila Velha, no estado do Espírito Santo, foi considerada como área de estudo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

A área de estudo (Figura 1) compreende toda a região norte do município de Vila Velha - ES. A região está localizada sobre planícies fluviais e litorâneas e possui uma rede de drenagem complexa. Adicionalmente, encontra-se em área de baixa declividade e onde o adensamento urbano alterou significativamente a dinâmica hidrológica natural [5]. Segundo o Plano Municipal de proteção e defesa civil de Vila Velha [9], durante os anos de 2001 e 2019 foram registrados nove eventos de inundações e alagamentos que produziram

situações de calamidade ou emergência, prejudicando a população local e a cidade como um todo.

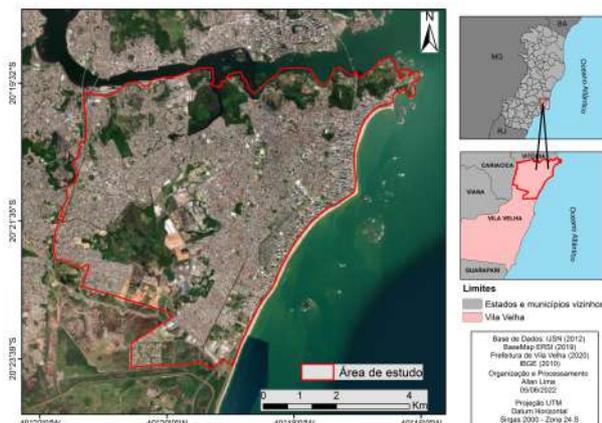


Figura 1: Área de estudo (vermelho) em Vila Velha, ES.

2.2. Materiais

A modelagem baseou-se no conceito de processos pontuais espaciais que permite definir e estimar uma medida de suscetibilidade como um fenômeno que varia continuamente no espaço [8]. Para tanto, utilizou-se o modelo aditivo generalizado SPGAM (*Spatial Generalized Additive Models*). A regressão permite modelar a relação entre variáveis, possibilitando analisar a influência que as variáveis explicativas têm sobre a variável resposta.

A variável resposta corresponde aos pontos de ocorrência de inundações e/ou alagamentos e foram acessados do mapeamento de áreas suscetíveis a inundações e alagamentos produzidos pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em 2015 [10].

As variáveis explicativas correspondem a três grupos de dados, listados na Tabela 1: (i) relevo: Declividade, Elevação e Orientação de Vertentes, extraídas do Modelo Digital de Elevação produzidos pelo Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - IEMA/ES [11]; (ii) drenagem: Distância Euclidiana à rede de drenagem, gerado pela prefeitura de Vila Velha [9]; e (iii): impermeabilização do solo representado pelos os índices espectrais: *Normalized Difference Built-Up Index* - NDBI [12], *Built-up Index* - BU [13] e *Normalized difference vegetation index* - NDVI [14] obtidos a partir das bandas B04 (RED), B08 (NIR) e B11 (SWIR) do satélite Sentinel 2 (data da passagem: 09/03/2016).

Variável explicativa	Formato/Resolução	Unidade de medida
Declividade	Raster (5m)	Porcentagem
Elevação	Raster (5m)	Metros
Orientação de vertente	Raster (5m)	Graus
Distância euclidiana à drenagem	Shape	Metros
BU	Raster (10m)	0 a 1
NDBI	Raster (10m)	1 a -1
NDVI	Raster (10m)	1 a -1

Tabela 1: Variáveis explicativas utilizadas na modelagem.

2.3. Métodos

A metodologia foi desenvolvida em três etapas (Figura 2): preparação e extração dos atributos das variáveis resposta e

explicativas; organização das variáveis em um banco de dados geográfico; e modelagem SPGAM e avaliação do modelo.

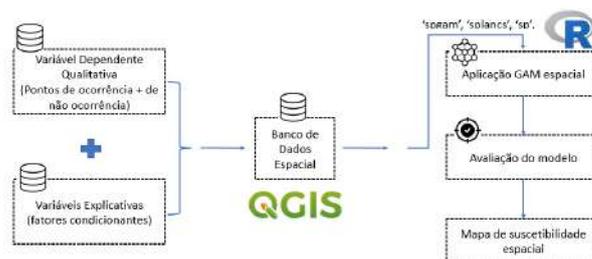


Figura 2: Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho.

Na primeira etapa, de preparação das variáveis, primeiro, a variável resposta - ocorrência de inundação e/ou alagamento - foi obtida e adaptada. As áreas de inundação e/ou alagamento mapeadas pela CPRM consideram três classes de suscetibilidade: alta, média e baixa. Analisando-se o contexto histórico das regiões classificadas pelo mapeamento e conhecendo-se a localização de eventos anteriores, fez-se uma divisão binária destas áreas. Atribuiu-se valor 1 para as áreas de altas e médias susceptibilidades e valor 0 para áreas de baixa suscetibilidade.

Na sequência, foram selecionadas variáveis explicativas para os aspectos físicos do terreno relacionados à ocorrência de alagamentos e inundação. Quanto às variáveis de relevo, locais mais planos, de menor declividade, tendem a acumular mais água. As orientações das vertentes condicionam a condução e o fluxo de água para os canais de drenagem, com consequências associadas a inundações e alagamento em regiões mais baixas [7]. Quanto à drenagem, áreas mais próximas à rede de drenagem têm maiores chances de alagamento e inundações ocorrerem. E quanto à impermeabilização do solo, o adensamento urbano, usualmente produz impermeabilização do solo com duas principais consequências consideradas neste estudo. Primeiro, superfícies impermeáveis facilitam o escoamento superficial da água e o rápido aumento do volume no canal de drenagem. Tem-se assim a intensificação das cheias, transbordamentos e inundações. Segundo, a impermeabilização impede a infiltração e percolação da água, favorecendo os alagamentos.

Na segunda etapa, após sistematizar todos os dados em um banco de dados geográficos, procedeu-se uma amostragem de pontos, sorteados aleatoriamente para representar as áreas de ocorrência e não ocorrência dos eventos (Figura 3), considerando o mapeamento CPRM e as classes de suscetibilidade consideradas.

No total, foram sorteados 600 pontos, 300 para a classe ocorrência, associados às susceptibilidade média e alta, e 300 para a classe não-ocorrência. Para todos os pontos, obteve-se o valor para cada variável explicativa: para as variáveis de relevo, assumiu-se o valor da grade associada ao ponto; para a drenagem, calculou-se o valor de distância Euclidiana à drenagem mais próxima, e para as variáveis associadas à impermeabilização, obteve-se o valor do pixel associado ao ponto. Deste total, 70% dos pontos foram utilizados para o treinamento do modelo e 30% para validação.

Na terceira etapa, seguiu-se a modelagem. O SPGAM é um modelo de regressão logística alternativo ao *Generalized*

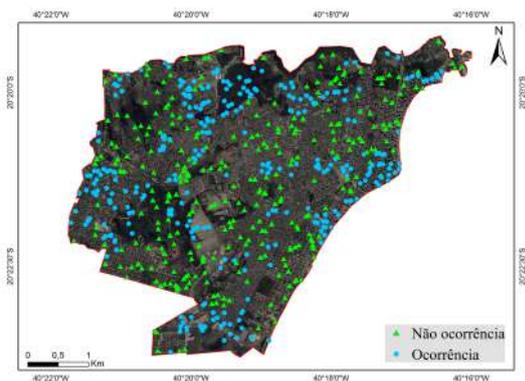


Figura 3: Espacialização dos pontos amostrais de ocorrência e não ocorrência.

Additive Model (GAM) [15], estendido por uma componente aditiva espacial $g(s)$ que, por sua vez varia suavemente na região de estudo. Ou seja, trata-se de um GAM com uma função de ligação logit, conforme sugerido por [8] e calculado conforme a equação a seguir:

$$\text{logit}[p(s)] = \log\left(\frac{p(s,X)}{1 - p(s,X)}\right) = \beta X + g(s) \quad (1)$$

onde: $p(s,X)$ é a probabilidade de ocorrência de inundação e/ou alagamento na posição s considerando as variáveis explicativas X , β são os coeficientes de regressão das variáveis explicativas e $g(s)$ é uma função Kernel (uma função de suavização).

A partir das amostras de treinamento, os parâmetros do modelo são ajustados por meio do método de análise sequencial. Este método permite avaliar o efeito do acréscimo de uma ou mais variáveis no modelo, de modo que apenas as variáveis significativas são selecionadas no modelo final. Deste modelo, obtém-se o primeiro resultado que é a superfície espacial de probabilidade.

Após a aplicação do modelo deve-se comprovar a significância da variação da suscetibilidade calculada na região de estudo. Ou seja, verificar se há evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula de suscetibilidade constante na região ($g(s) = 0$). Neste trabalho, o teste global da suscetibilidade foi realizado por meio do método de simulação Monte Carlo (30% das amostras) [8]. Procedeu-se também uma avaliação comparando-se os valores estimados da superfície de suscetibilidade (entre 0 e 1) e os valores das classes dos pontos de validação. E por fim, foi apresentado um exemplo de inundação real em uma determinada porção da área de estudo comparando com a suscetibilidade modelada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como os dados de entrada referem-se aos anos de 2015 a 2016, os resultados de análise temporal da probabilidade de ocorrência dos eventos limitam-se a este período específico. Os resultados dos testes estatísticos para análise das variáveis significativas, com as estimativas dos coeficientes β e sua significância (valor-p), são apresentados na Tabela 2. A variável orientação de vertentes não apresentou coeficiente

significativo (valor-p = 0,505), e, portanto, foi retirada do modelo.

Variáveis	Coefficientes	valor-p
Intercepto (β_0)	-1,493	9,740E-03
Elevação	-0,059	8,969E-06
Orientação de vertentes	0,001	5,050E-01
Declividade	0,086	4,742E-09
Distância euclidiana à drenagem	-0,001	1,406E-14
BU	2,373	5,728E-04
NDBI	2,773	5,261E-05
NDVI	2,930	5,745E-05

Tabela 2: Resultado da análise estatística do modelo.

A partir dos resultados da análise estatística, o modelo espacial aplicado corresponde a:

$$\text{logit}[p(s)] = \beta_0 + \beta_1 \text{Elevação} + \beta_2 \text{Declividade} + \beta_3 \text{Dist.Drenagem} + \beta_4 \text{BU} + \beta_5 \text{NDBI} + \beta_6 \text{NDVI} + g(s) \quad (2)$$

Após 500 simulações pelo método Monte Carlo obteve-se um valor-p = 0,0076 para o teste global de suscetibilidade constante. Evidencia-se assim que a suscetibilidade não é constante. Isto indica a existência de uma variação espacial global significativa da probabilidade associada à ocorrência de inundação e/ou alagamento (Figura 4).

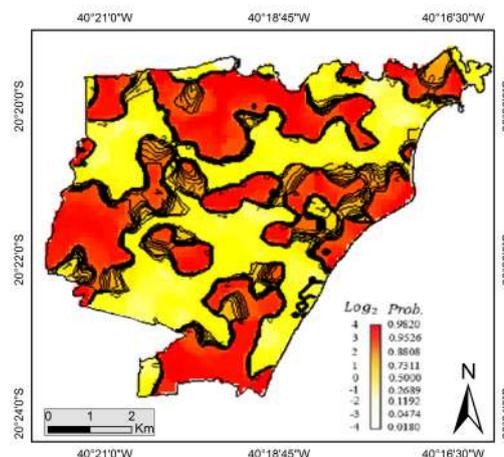


Figura 4: Mapa de suscetibilidade espacial a inundação e alagamento para a região de estudo.

As regiões de maior suscetibilidade a alagamento e inundação representou corretamente áreas com grande concentração de pontos de ocorrência da variável resposta (Figura 3). Confirma-se, assim, que o modelo apresenta coerência, indicando diversos hotspots na área de estudo, evidenciando as áreas críticas (tons avermelhados) onde a ocorrência de eventos pode ser mais frequente.

A Figura 5 apresenta a comparação dos valores de suscetibilidade obtidos pelo modelo com os valores das classes de ocorrência e não ocorrência do evento. Em relação ao comportamento dos pontos de não ocorrência, eles apresentaram uma maior variação de valores de suscetibilidade estimada, visualizado pela maior distribuição no diagrama (corpo mais alongado em cinza). Ou seja, para essa classe o modelo apresentou mais erros. Alguns pontos foram considerados como de alta suscetibilidade, como, por

exemplo, o de valor máximo registrado no *boxplot*. Para a classe de ocorrência (em vermelho) o diagrama apresentou um comportamento assimétrico positivo. O resultado indica que 90,1% dos pontos apresentaram probabilidades acima de 0,90, evidenciando que o modelo empregado possui boa capacidade de predição da suscetibilidade à ocorrência de inundação e alagamentos na região estudada.

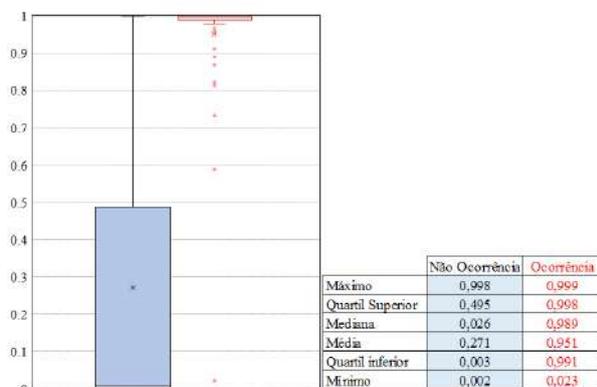


Figura 5: Avaliação da suscetibilidade estimada pelo modelo.

Finalmente, a Figura 6 apresenta uma análise comparativa da superfície estimada (SPGAM) com os registros de eventos de inundações e alagamentos, para uma sub-região. Neste caso, observa-se o bairro de Cobilândia, onde os rios Marinho e Aribiri circundam o bairro. O evento registrado em 2019 confirma o padrão de suscetibilidade indicado pela modelagem, principalmente por ter ocorrido fora do período analisado, evidenciando a aderência da modelagem com a realidade.

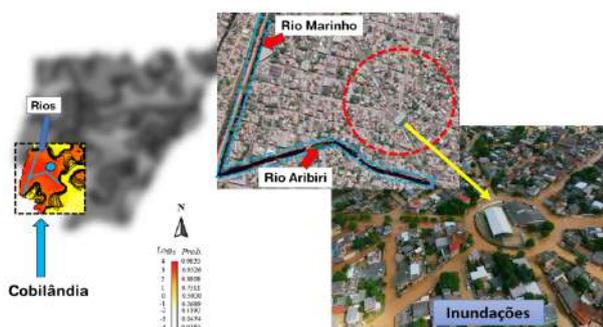


Figura 6: Relação entre o mapeamento final a evidência de eventos na região do bairro Cobilândia em 2019.

4. CONCLUSÕES

A modelagem espacial de inundações e alagamentos em espaços urbanos é um desafio. Estes eventos são complexos, requerem análises multivariadas e abordagens potencialmente não lineares. Neste trabalho, apresentamos uma possibilidade de modelagem espacial, baseada em SPGAM e variáveis físicas do terreno e índices espectrais para estudar o caso de alagamentos e inundações em Vila Velha (ES). O modelo desenvolvido mostrou ser satisfatório, aderente à realidade local.

Contudo, tratando-se de uma primeira abordagem, recomenda-se para trabalhos futuros, explorar um número

maior de variáveis explicativas, como por exemplo a distância da rede de drenagem ao longo dos caminhos de fluxo, área acumulada expandida e HAND (*Height Above the Nearest Drainage*). Assim, as análises poderão fornecer mais informações para compreender estes eventos, reduzindo a variabilidade e incertezas na modelagem final.

Dessa forma, a modelagem pode ser uma ferramenta útil não apenas para estudar os processos, mas também para gerar informações que possam auxiliar o planejamento de políticas e estratégias de prevenção e mitigação desses desastres.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Ministério da Integração Nacional. Classificação e codificação brasileira de desastres Brasil. *Ministério Da Integração Nacional*, Instrução Normativa (v.01):páginas (pp.21), 2012.
- [2] UNESCO. *United Nations World Water Development Report 2020*. UNESCO, Paris, 2020.
- [3] A. L. C. Castro. *Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres*. Ministério do Planejamento e Orçamento, Brasília, 1998.
- [4] P.R. Shukla and Et al. *INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC (2019). Summary for Policymakers*. IPCC, 2019.
- [5] M. A. Deina and A. L. N. Coelho. A influência da zona de convergência do atlântico sul (zcas) nos eventos de inundação no baixo jucu em vila velha (es). *Geografia (Londrina)*, volume (v.24):páginas (pp.19), 2015.
- [6] B. Igrimm and Et.al. Global change and the ecology of cities. *Science*, volume (v.319):páginas (pp.4), 2008.
- [7] L. Zaharia, R. Costache, R Pravalie, and G. Ioana-Toroimac. Mapping flood and flooding potential indices: a methodological approach to identifying areas susceptible to flood and flooding risk. case study: the prahova catchment (romania). *Frontiers of Earth Science*, volume (v.11):páginas (pp.18), 2017.
- [8] J. Kelsall and P. Dieggle. Spatial variation in risk of disease: a nonparametric binary regression approach. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, volume (v.47):páginas (pp.14), 1998.
- [9] Prefeitura Municipal de Vila Velha. *Plano Diretor de Drenagem Urbana Sustentável*. PMVV, 2011.
- [10] Serviço Geológico do Brasil CPRM. *Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação e alagamentos: município de Vila Velha - ES*. CPRM, 2015.
- [11] Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *IEMA - Mapas 2012-2015*. IEMA, 2011.
- [12] Y. Zha, J. Gao, and S. Ni. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from tm imagery. *International Journal of Remote Sensing*, volume (v.24):páginas (pp.11), 2003.
- [13] J. C. Valdiviezo and Et al. Built-up index methods and their applications for urban extraction from sentinel 2a satellite data: discussion. *Journal of the Optical Society of America A*, volume (v.35):páginas (pp.9), 2018.
- [14] B. C. Gao. Ndwii a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, volume (v.58):páginas (pp.9), 1996.
- [15] T. J. Hastie and R. J. Tibshurani. *Generalized Additive Models*. Chapman and Hall, New York, 1990.