

**Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**

---

## Modelagem de Risco e Perigo de Incêndios Florestais com Simulações de Propagação

Isaac D. B. Silva<sup>1</sup>

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UFAC, Rio Branco, AC

Laécio C. Barros<sup>2</sup>

Departamento de Matemática Aplicada, UNICAMP, Campinas, SP

João F. C. A. Meyer<sup>3</sup>

Departamento de Matemática Aplicada, UNICAMP, Campinas, SP

**Resumo.** Este trabalho visa modelar o perigo e o risco de incêndios florestais utilizando duas ferramentas matemáticas distintas: um sistema dinâmico fuzzy e um classificador do tipo k-NN (k-NN é o acrônimo de k-Nearest Neighbors). As variáveis de entrada do primeiro são umidade relativa do ar e precipitação pluvial e a saída gera uma série temporal que modela o perigo de incêndio. O segundo tem como entradas as variáveis geográficas: altitude, tipologia florestal e as distâncias para curso d'água e para estradas mais próximos enquanto a saída é a probabilidade condicional da classe  $\omega_1$  (que representa a presença de focos de calor), dado que o padrão de teste  $x_t$  foi classificado. Esses dois índices são utilizados para simular a propagação de incêndios florestais a partir da metodologia dos autômatos celulares. O estudo é realizado para o Estado do Acre com informações geo-referenciadas dos anos de 2003 a 2014. A acurácia do classificador k-NN foi de 84,3% junto a um conjunto de teste e apenas para um percentual de 4,52% de focos de calor ocorridos em 2014 foi atribuído risco zero. A estimativa do risco temporal para o ano de 2014 foi avaliada por meio de uma classificação binária, na qual obteve-se acurácia de 73,97% com área abaixo da curva ROC de 87,94%. Após a simulação de propagação de incêndios utilizando os autômatos celulares verificou-se que 62,86% dos focos de calor que ocorreram em 2014 pertencem a células que foram atingidas pelo “incêndio”.

**Palavras-chave.** Incêndios Florestais, Classificador k-NN, Sistema Fuzzy, Autômatos Celulares.

## 1 Introdução

A floresta amazônica possui grande importância não só para a população local, mas também para o restante do mundo. Os incêndios florestais que ocorrem na Amazônia como um todo, são o resultado de severas secas e das práticas de corte-queima para a limpeza de roçados que muitas vezes se tornam incontroláveis. O impacto ambiental gerado pelas

---

<sup>1</sup>isaacdb@yahoo.com.br

<sup>2</sup>laeciocb@ime.unicamp.br

<sup>3</sup>joni@ime.unicamp.br

queimadas atinge a qualidade do solo e do ar e, conseqüentemente, a biodiversidade é alterada [1].

A literatura diferencia os conceitos de *índice de risco* e *perigo de incêndios*. Enquanto o primeiro está associado à probabilidade de um incêndio se iniciar em função da presença e/ou atividades de agentes causadores (nesse trabalho: altitude, tipologia florestal, distâncias para estrada e curso d'água); o segundo relaciona-se às características do material combustível (caráter permanente) e condições climáticas (caráter variável) - nesse trabalho foram utilizadas apenas umidade relativa do ar e precipitação pluvial - que predisõem à ignição do incêndio ou representam dificuldade para a extinção [5].

A ocorrência de queimadas em vários Estados da região amazônica, incluindo o Acre tem sido objeto de atenção pela grande mídia brasileira em 2015 [3] e o total de focos de calor no Acre vem aumentando nos últimos anos e alcançando valores próximos ao ano de 2005, no qual ocorreram fenômenos extremos de seca e incêndios florestais [7].

O objetivo central deste trabalho é modelar o risco e o perigo de incêndios: o perigo de incêndio vai ser caracterizado apenas de fatores climáticos e que denominaremos de risco temporal  $R_t$  e o outro depende apenas de variáveis espaciais e será denominado risco espacial  $R_e$ . Foi elaborado um estudo de caso para o Estado do Acre com dados geo-referenciados dos anos de 2003 a 2014.

## 2 Risco de incêndio temporal e sistema fuzzy

Seja  $U$  um conjunto clássico; um subconjunto fuzzy  $F$  de  $U$  é caracterizado por uma função  $\varphi_F : U \rightarrow [0, 1]$ , denominada função de pertinência de  $F$ , associando a cada  $x \in U$  o grau de pertinência  $\varphi_F(x)$  de  $x$  em  $F$  [2].

Na teoria de conjuntos fuzzy, as variáveis linguísticas têm papel importante. Variável linguística é um substantivo e seus valores são adjetivos. Os conjuntos fuzzy representam os estados (adjetivos) da variável linguística que, em geral, são expressos por termos subjetivos como *grande*, *pouco*, *baixo*, entre outros e modelados por conjuntos fuzzy [6].

Um sistema baseado em regras fuzzy, essencialmente, possui quatro componentes principais: um processador de entrada (ou fuzzificador), uma base de regras fuzzy, um método de inferência fuzzy e um processador de saída (ou defuzzificador), gerando um número real como sua saída [8]. O método de inferência utilizado neste trabalho é o de Mamdani e a defuzzificação foi realizada através do método do Centro de Gravidade [2].

O sistema proposto neste trabalho foi baseado no sistema dinâmico p-fuzzy estudado em [10], e dado por

$$R_{t+1} = \max(0, R_t + \Delta(R_t)) \quad (1)$$

onde  $R_t$  é o risco temporal no instante  $t$ ,  $\Delta(R_t) = f(U_t, P_t)$  é a variação do risco e  $f$  é obtida por um sistema baseado em regras fuzzy, no qual as variáveis linguísticas de entrada são a umidade relativa do ar  $U_t$  e precipitação pluvial total diária  $P_t$  no instante  $t$ , como pode ser visualizado no diagrama da Figura 1.

O risco temporal definido dessa forma é um valor real e positivo para cada  $t$ . A seguir, encontra-se estudo para o Estado do Acre a partir desse modelo.

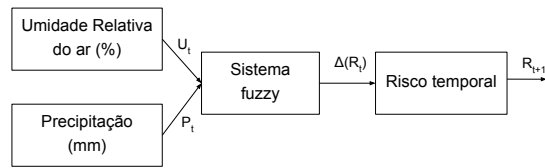


Figura 1: Diagrama em blocos do sistema fuzzy para o risco temporal.

### 2.1 Estudo de Caso 1: Estado do Acre

As variáveis linguísticas de entrada *umidade relativa do ar* e *precipitação pluvial* assumem as classificações: MUITO BAIXA, BAIXA, MÉDIA, ALTA, MUITO ALTA.

Tanto os suportes dos conjuntos fuzzy para as variáveis linguísticas quanto a base de regras do sistema fuzzy foram ajustados a partir de informações fornecidas por especialistas e das informações de umidade, precipitação e focos de calor da cidade de Rio Branco nos anos de 2003 a 2013 [4, 7]. Os dados climáticos da capital Rio Branco foram considerados para o Estado do Acre inteiro.

A Figura 2 ilustra as séries temporais de valores de risco temporal fornecida pelo modelo em questão e do percentual de focos de calor de Rio Branco-AC para o ano de 2014.

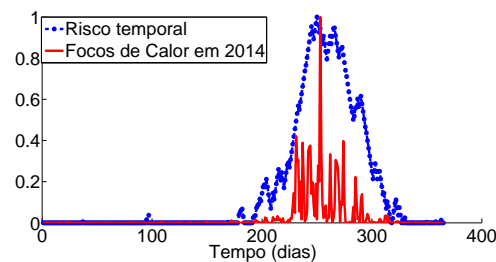


Figura 2: Focos de calor e risco temporal para o ano de 2014.

Para avaliar a qualidade da estimativa do risco temporal, considerou-se os resultados obtidos como uma classificação binária, para a qual obtivemos acurácia de 73,97% e a área abaixo da curva ROC é 0,8794.

## 3 O risco espacial e o problema de classificação

Outro estudo de interesse foi obter um mapeamento  $R_e$  que associou variáveis espaciais de um domínio  $\Omega \subset \mathbb{R}^n$  ao conjunto imagem  $\mathbb{R}$  tal que para cada  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $y = R_e(x) \in [0, 1]$  é o risco de incêndio espacial associado a  $x$ . Para atingir esse objetivo, utilizou-se o classificador k-vizinhos mais próximos (k-NN do acrônimo k-Nearest Neighbors) e o risco espacial foi definido como a probabilidade condicional da classe  $\omega_1$  (presença de focos de calor) dado que o padrão  $x_t$  foi classificado.

As variáveis de entrada escolhidas para o classificador são: altitude, tipologia, distância para curso d'água e distância para a estrada mais próximos, todas geo-referenciadas. A variável de saída é binária e representa a presença (classe  $\omega_1$ ) ou não (classe  $\omega_0$ ) de foco na célula considerada.

O diagrama da Figura 3 ilustra o modelo do classificador proposto.

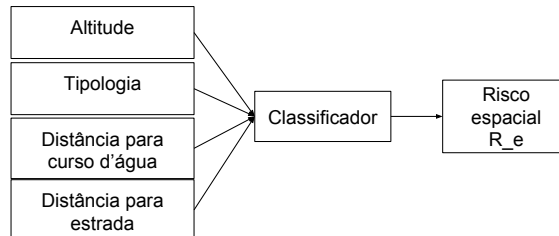


Figura 3: Diagrama em blocos do classificador

Define-se aqui o risco incêndio espacial pela Fórmula:

$$R_e = P(\omega_1|x_t) \tag{2}$$

onde  $P(\omega_1|x_t)$  é a probabilidade condicional da classe ser  $\omega_1$  dado que o padrão  $x_t$  foi classificado. A probabilidade condicional da Fórmula 2 pode ser calculada pelo teorema de Bayes [11].

### 3.1 Estudo de Caso 2: Estado do Acre

Com a metodologia da seção anterior, foi obtido o risco espacial para o Estado do Acre. Os mapas geo-referenciados foram obtidos a partir do Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Acre fornecidos pela Fundação de Tecnologia do Estado do Acre - FUNTAC [1].

O risco incêndio espacial é a probabilidade condicional da classe  $\omega_1$  (que representa a presença de focos de calor), dado que o padrão de teste  $x_t$  foi classificado, que para o classificador k-NN, é dada pela fórmula:

$$R_e = P(w_1|x_t) = \frac{n_{viz}}{k}, \tag{3}$$

onde  $n_{viz}$  é o número de vizinhos do padrão  $x_t$  que estão na classe  $\omega_1$  e  $k$  é o número total de vizinhos mais próximos [11]. O Hamming Loss calculado junto ao conjunto de teste foi de 15,70%.

A Figura 4a apresenta todos os focos de calor ocorridos no Estado do Acre em 2014 e a Figura 4b ilustra a predição do risco espacial para todos os dados relativos à discretização do domínio considerado.

A Tabela 1 apresenta o percentual de focos de calor e do total de células do domínio que apresentam risco espacial zero e maior que 20%. Esses números indicam que, de fato, locais com maior risco espacial estão mais propensos à ocorrência de novos focos de calor.

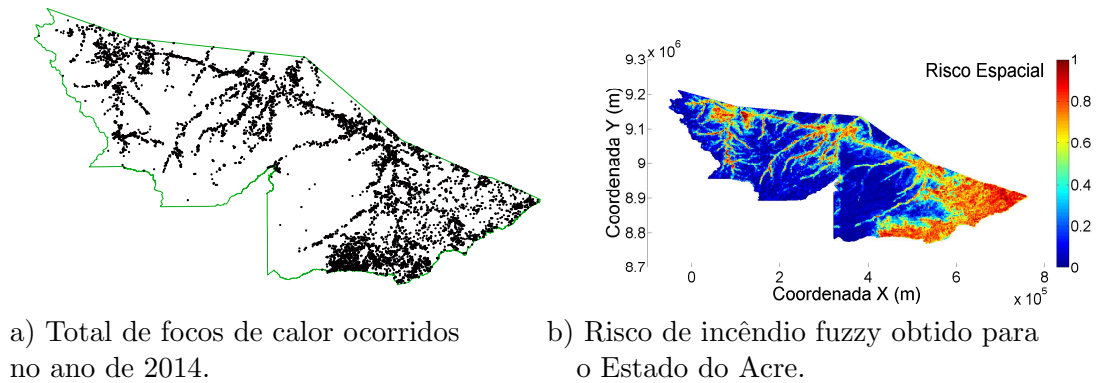


Figura 4: Mapa de ocorrência de focos de calor e a predição de risco de incêndio espacial para o ano de 2014 [7].

Tabela 1: Percentuais de focos de calor ocorridos em 2014 e do total de células do domínio.

Risco Espacial	Percentual	
	Focos de Calor	Total de Células
Zero	4,52%	48,12%
Maior que 20%	80,5%	29,24%

Nesse trabalho, utilizou-se a metodologia de autômatos celulares combinada com os índices obtidos para gerar simulações de propagação de incêndios que será apresentada na próxima seção.

#### 4 Modelo de propagação de incêndios com Autômatos Celulares

Os Autômatos Celulares (AC) são representações matemáticas para sistemas físicos com espaço, tempo e quantidades físicas discretizados [12].

A malha do AC utilizado nesse trabalho é bidimensional e retangular e cada célula  $x \in \mathbb{L}$  será denotada por suas coordenadas  $(x_i, y_i)$  no plano. Os valores que as células assumem são conhecidas como estados e o conjunto de estados que uma célula pode assumir é representado por  $\mathbb{Q}$ . Para o AC que irá simular a propagação de incêndio consideramos  $\mathbb{Q} = \{0, 1, 2, 3\}$ . Mais detalhes sobre esse modelo podem ser encontradas em [9]

Para definir as regras de mudança de estado das células do autômato faz-se necessário definir o risco de incêndio efetivo -  $R_{ef}$ . O risco de incêndio efetivo -  $R_{ef}(x_i, y_j, n)$  - associado à célula  $(x_i, y_j)$  no tempo  $n$  é dado pela fórmula:

$$R_{ef}(x_i, y_j, n) = t_L(R_e, R_t) = \max(0, R_e(x_i, y_j) + R_t(n) - 1) \tag{4}$$

para todo  $(x_i, y_j) \in \Omega$  e  $n \in \{1, \dots, T\}$ . A notação  $t_L$  representa a norma triangular (t-norma) de Lukasiewski.

A mudança do estado “vegetação” para o estado “queimando” de uma determinada célula  $(x_i, y_i)$  do autômato somente ocorre quando o risco de incêndio temporal for positivo, ou seja,  $R_t > 0$ . Além disso, se uma célula  $(x_i, y_j)$  encontra-se no estado queimando, o “fogo” será propagado para outra célula  $(u_i, v_j) \in E(x_i, y_j)$  pertencente a vizinhança da primeira quando o risco efetivo  $R_{ef}(u_i, v_j, n)$  for maior que  $c_1$  (**condição de propagação**), ou seja,

$$R_{ef}(u_i, v_j, n) > c_1 \quad (5)$$

onde  $c_1$  é uma constante que está associada à dificuldade de propagação do fogo em virtude da combinação dos riscos temporal e espacial da célula na vizinhança.

A mudança do estado “queimando” para o estado “queimado” é feita quando  $p((x_i, y_j)) < B(R_t(n))$  onde  $p$  é um parâmetro aleatório com distribuição uniforme  $U[0, 1]$  e  $B(R_t(n))$  é um parâmetro chamado **Limiar de Extinção** dado pela Fórmula 6.

$$B(n+1) = \begin{cases} B(n) - c_3 * R_t(n) & \text{se } R_t(n) > 0 \\ B(n) & \text{se } R_t(n) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

onde  $c_3$  é um parâmetro que define uma taxa de redução no parâmetro  $B$ , de uma iteração para a seguinte, em virtude de  $R_t$  ser positivo [9].

#### 4.1 Estudo de Caso 3: Estado do Acre

As simulações de incêndio florestal para o Estado do Acre foram realizadas com uma malha de 226.267 pontos distribuídos na região em estudo e com dados climáticos e de focos de calor registrados no ano de 2014. Para esse trabalho, encontrou-se  $c_1 = 0.2$  (**condição de propagação** (5)),  $c_2 = 0.05$  (**limiar de alcance**) e  $c_3 = 0.1$  (taxa de decrescimento do **limiar de extinção**  $B$ ) [9].

Ao verificar a ocorrência espacial dos focos de calor em 2014 e o resultado final da simulação do autômato celular, obteve-se que 62,86% dos focos de calor que ocorreram em 2014 pertencem a células que foram atingidas pelo “incêndio”.

### 5 Conclusões

O trabalho desenvolvido modela o perigo e o risco de ocorrência de incêndios por técnicas diferentes. O primeiro está associado à variação dos fatores climáticos durante um ano completo para estimar o período no qual esse índice – aqui denominado risco temporal – se torna positivo e começa a aumentar. O último – denominado aqui de risco espacial – é obtido a partir de um sistema de aprendizado computacional que identificou, baseado em um histórico de ocorrências de focos de calor, características físicas do meio estudado que estão associadas ao fenômeno dos incêndios. A acurácia do classificador k-NN foi de 84,3% e apenas para um percentual de 4,52% de focos de calor ocorridos em 2014 foi atribuído risco zero. Em relação ao risco temporal, a estimativa para o ano de 2014 foi avaliada a partir de uma classificação binária, na qual obteve-se acurácia de 73,97% e o valor da área abaixo da curva ROC foi 0,8794. Após a simulação de propagação de

incêndios florestais utilizando os autômatos celulares verificou-se que 62,86% dos focos de calor que ocorreram em 2014 pertencem a células que foram atingidas pelo “incêndio”.

Os modelos apresentados nesse trabalho são originais e formam a concepção inicial dos modelos apresentado em [9].

## Agradecimentos

O primeiro autor agradece a bolsa de doutorado da CAPES, o segundo autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)– processo 305862/2013-8.

## Referências

- [1] Acre, G. E. A. (2010). Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre, Fase II (Escala 1:250.000): Documento Síntese. Ed. Rio Branco: SEMA.
- [2] Barros, L. C. e Bassanezi, R. C. (2010). Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática. Coleção IMECC. Textos Didáticos. IMECC - UNICAMP, Campinas, 2 edition.
- [3] Bertoni E. Queimadas recorde avançam sem controle, caderno Cotidiano (Jan. 15 2015). URL <http://folha.com/no1699987>.
- [4] Brasil, M. A. P. A. (2011). Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 20/06/2015.
- [5] Brown, A. A. e Davis, K. P. (1973). Forest Fire. McGraw Hill, New York, 2 edition.
- [6] Cecconello, M. S. (2006). Modelagem alternativa para dinâmica populacional: Sistemas dinâmicos fuzzy. Dissertação de Mestrado. IMECC- UNICAMP, Campinas.
- [7] Inpe, D. P. I. (2011). Divisão de processamento de imagens. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/>. Acesso em: 20/03/2015. 6029–6036.
- [8] Pedrycz, W. e Gomide, F. (2007). Fuzzy Systems Engineering. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- [9] Silva, I. D. B. (2017). Sistema de Alerta de Incêndio Florestal. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.
- [10] Silva, J. D. M. (2005). Análise de Estabilidade de Sistemas Dinâmicos P-fuzzy com Aplicações em Biomatemática. Tese de doutorado, Unicamp.
- [11] Webb, A. R. (2002). Statistical Pattern Recognition. John Wiley & Sons, Ltd., Malvern, UK, 2 edition.
- [12] Wolfram, S. (1994). Cellular Automata and Complexity. Addison-Wesley, 1 edition.