

Autômato Celular na Propagação de Incêndios Florestais Baseado em Densidade, Altitude e Umidade

Luiz Eduardo da Silva Ferreira¹, Jones Oliveira de Albuquerque¹

¹Departamento de Estatística e Informática
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Recife – PE – Brasil

{luiz.eduardoferreira, jones.albuquerque}@ufrpe.br

Resumo. *Este trabalho tem como objetivo desenvolver um simulador para a propagação do fogo em ecossistemas florestais, utilizando um modelo de autômato celular (CA). O modelo considera variáveis intrínsecas de cada célula da grade que representa o terreno, incluindo a umidade da vegetação e a elevação topográfica. Esses parâmetros permitem representar a influência de fatores ambientais sobre a propagação do fogo. O simulador foi implementado em linguagem Python, com uso da biblioteca Pygame, possibilitando a visualização dinâmica da propagação em cenários nos quais a topografia e a umidade interferem no avanço das chamas.*

Palavras-chave: *simulação, autômato celular, incêndio florestal, altitude, umidade, densidade.*

Abstract. *This study aims to develop a simulator for fire propagation in forest ecosystems, using a Cellular Automaton (CA) model. The model incorporates intrinsic variables for each cell in the grid representing the terrain, including vegetation moisture and topographic elevation. These parameters allow for the representation of environmental factors influencing fire spread. The simulator was implemented in the Python programming language, using the Pygame library, enabling dynamic visualization of fire propagation in scenarios where topography and moisture affect the advancement of the flames.*

Keywords: *simulation, cellular automaton, wildfire, elevation, moisture, density.*

1. Introdução

Os incêndios florestais constituem um das perturbações ecológicas mais significativas em escala global, com profundas implicações ambientais, sociais e econômicas (Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2024). A crescente frequência e intensidade desses eventos, potencializadas por alterações climáticas como escassez de chuvas, calor excessivo e fatores antrópicos, demandam ferramentas cada vez mais sofisticadas para a previsão de seu comportamento (Jolly et al., 2015). A capacidade de modelar a dinâmica da propagação do fogo se torna um fator importante na previsibilidade destes eventos, permitindo o desenvolvimento de estratégias de combate mais eficazes, o planejamento do uso da terra e a mitigação de danos a ecossistemas e comunidades.

A dinâmica de um incêndio é um fenômeno complexo, regido por interações não lineares entre o combustível (tipo, densidade e umidade da vegetação), a topografia (declividade, altitude e orientação) e as condições atmosféricas (vento, temperatura e umidade relativa) (LEMOS, Natasha, Humaitá/AM, julho de 2021). Modelos tradicionais baseados em equações diferenciais parciais

descrevem esses processos com precisão, mas apresentam alto custo computacional, o que limita sua aplicação em tempo real ou em grandes áreas. Nesse contexto, os autômatos celulares (AC) constituem uma alternativa para modelar sistemas complexos, inferindo padrões globais a partir de regras locais aplicadas a uma grade de células discretas (WOLFRAM, 1986), com potencial para representar comportamentos do mundo real, como dinâmicas e projeções de mercado financeiro (PALOMA, 2019), bem como fatores ambientais, incluindo a propagação de incêndios florestais.

Neste contexto, o presente trabalho descreve o desenvolvimento de um modelo de autômato celular que incorpora variáveis ambientais como propriedades de cada célula, com o objetivo de analisar seu comportamento na dinâmica de propagação. As variáveis consideradas são: elevação topográfica, densidade de árvores e umidade da vegetação. O sistema foi implementado em linguagem Python, utilizando as bibliotecas NumPy, para manipulação de dados, e Pygame, para visualização dinâmica e interativa em um ambiente bidimensional com perspectiva aérea, além de um modo tridimensional isométrico, que permite melhor percepção da altitude de cada célula. O objetivo é avaliar a capacidade do modelo em gerar padrões de propagação que se aproximem da complexidade observada em incêndios reais.

2. Metodologia

O desenvolvimento do simulador foi fundamentado no paradigma dos autômatos celulares (AC), com a implementação realizada em linguagem Python. A metodologia foi estruturada em etapas, abrangendo a definição do framework do autômato, a implementação computacional, a estruturação dos dados do ambiente, a formulação das regras de transição e o desenvolvimento da interface de visualização.

O modelo foi implementado como um autômato celular bidimensional, estruturado em uma grade 2D de dimensões fixas (*grid_cols* × *grid_rows*), representando a área da floresta. Cada célula pode assumir um de quatro estados discretos: *árvore* (1 — combustível intacto), *queimando* (-1 — combustível em combustão), *queimado* (2 — combustível consumido) e *vazio* (0 — solo sem combustível).

Adotou-se a vizinhança de von Neumann, na qual, para uma célula de coordenadas (*i*, *j*), são consideradas as quatro células adjacentes nas direções cardiais: (*i*-1, *j*), (*i*+1, *j*), (*i*, *j*-1) e (*i*, *j*+1). As fronteiras são fechadas, de modo que as células localizadas nas bordas possuem um número reduzido de vizinhos e não ocorre transposição de estados para fora dos limites da simulação.

A transição de uma célula de “*árvore*” para “*queimando*” é influenciada por múltiplos fatores representados nas camadas do modelo, como *cell_status_layer* (estado atual da célula), *cell_moisture_layer* (umidade do combustível), *Max_elevation* (elevação máxima do terreno) e *tree_density* (densidade de árvores). O cálculo da probabilidade de ignição (Equação 1) é determinado pelo produto entre a probabilidade base de combustão ($\beta = 0,8$) — valor adotado conforme proposto em [WSRP25] *Modeling 3D Fire Spread Using Cellular Automata and Optimizing Fire Suppressant Placement* (2025) — e o fator de umidade, que reduz a probabilidade

de queima à medida que o teor de água aumenta. Além disso, o modelo incorpora o efeito da diferença de altitude entre a célula em análise e seus vizinhos, de forma a representar a influência da topografia na propagação do fogo.

Em áreas declivosas, a propagação do fogo tende a ser facilitada (Figura 1) à medida que o grau de inclinação aumenta. Desconsiderando-se a ação do vento, o fogo se propaga preferencialmente em direção ascendente, pois o calor das chamas aquece o combustível localizado acima, favorecendo sua ignição e continuidade da propagação (SCHUMACHER; DICK; MARIA, [s.d.]). Para melhor visualização da altitude e umidade, a coloração em verde mais escura foi atribuída às árvores mais altas e mais úmidas.

$$P_{queima} = \beta * (1 - U) * F_{altitude}$$



Fórmula 1 - Probabilidade de queima da árvore

Figura 1 - Influência da inclinação e exposição do terreno na propagação dos incêndios florestais.
Fonte: (SCHUMACHER; DICK; MARIA, [s.d.])

3. Resultados

As simulações realizadas evidenciam a capacidade do modelo desenvolvido em representar a propagação do fogo em ecossistemas florestais, considerando variáveis ambientais como elevação e umidade e indiretamente a densidade. A Figura 2 apresenta a configuração inicial da simulação, antes do início do incêndio, evidenciando a distribuição espacial da vegetação e do solo. A densidade da vegetação, controlada pelo parâmetro *tree_density*, define a proporção entre células com árvore (verde) e células vazias, somente o solo (marrom), configurando um ambiente propício para análise em condições controladas.

Na Figura 3, observa-se a evolução do incêndio a partir do foco inicial, com a propagação do fogo gerando áreas queimadas (representadas em cinza escuro). O padrão irregular de avanço das chamas reflete a influência direta da topografia e da umidade na dinâmica do fogo, modulando a velocidade e o alcance do incêndio e resultando em um comportamento espacial não homogêneo.

Esse resultado demonstra que o modelo simula aspectos da complexidade espacial da propagação do fogo, incorporando os efeitos moduladores do ambiente ao seu redor. A visualização

gráfica dinâmica facilita a visualização do avanço das chamas, podendo contribuir para o estudo dos processos envolvidos em diferentes contextos ambientais.

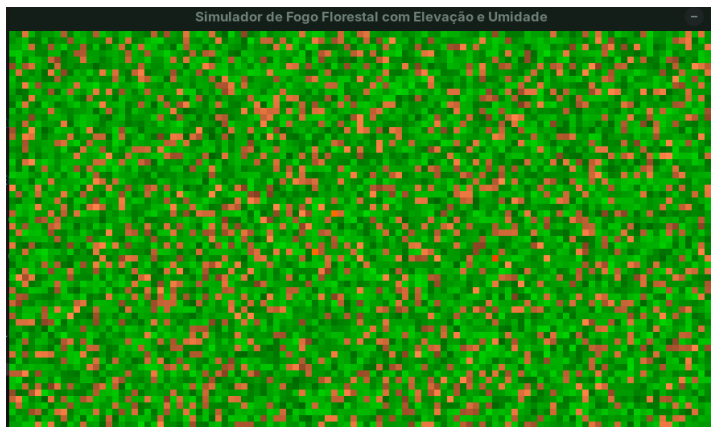


Figura 2 - Configuração inicial da simulação

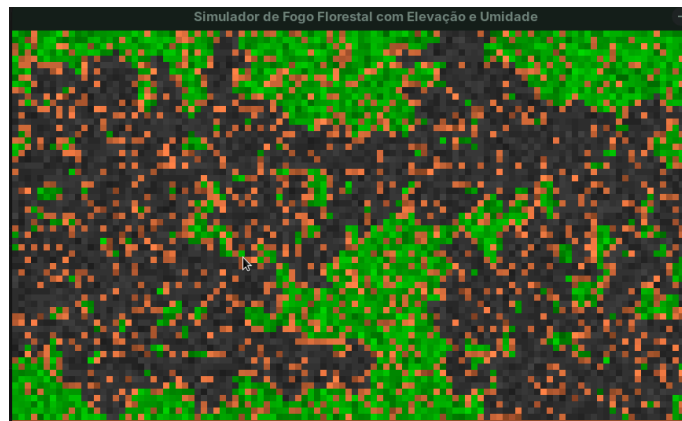


Figura 3 - Evolução do incêndio a partir do foco inicial

4. Trabalhos futuros

Em trabalhos futuros, pretende-se incorporar métricas adicionais que possam aprimorar a simulação, tais como a inclusão da direção e intensidade do vento, a visualização do campo de propagação em três dimensões e o desenvolvimento de uma ferramenta gráfica para edição do mapa ambiental. Essa interface possibilitaria a modificação dos parâmetros e configurações do ambiente sem a necessidade de alterações diretas no código-fonte, facilitando a usabilidade e a experimentação.

5. Conclusão

O presente trabalho desenvolveu um modelo de autômato celular capaz de simular a propagação de incêndios florestais considerando variáveis ambientais essenciais, como elevação topográfica, umidade da vegetação e densidade arbórea. As simulações demonstraram que o modelo é capaz de reproduzir padrões espaciais não homogêneos na propagação do fogo, evidenciando a influência desses fatores na dinâmica do incêndio. A implementação em Python com visualização dinâmica proporciona uma ferramenta potencialmente útil para estudos exploratórios da propagação do fogo em diferentes condições ambientais. Trabalhos futuros visam aprimorar o modelo com a inclusão de novos parâmetros e funcionalidades que aumentem sua aplicabilidade e realismo.

6. Referências

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE. **Incêndios Florestais**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2024. Disponível em: <<https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/incendios-florestais/>>.

JOLLY, W. M. et al. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, v. 6, n. 1, 14 jul. 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NO SUL DO AMAZONAS NATASHA SOUSA ARAUJO LEMOS ORIENTADOR PROF. DR. JOSÉ MAURICIO DA CUNHA Humaitá/AM Julho de 2021. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/8417/8/Disserta%C3%A7%C3%A3o_NatashaLemos_PPG_CA.pdf>.

PALOMA, X. **Modelagem de mercados financeiros via autômatos baseados em equações de diferença**. Disponível em: <<https://repositorio.cefetmg.br/items/b3c92f0a-8b21-49a6-acc1-166cdd4f774e/full>>. Acesso em: 12 ago. 2025.

[WSRP25] **Modeling 3D Fire Spread Using Cellular Automata and Optimizing Fire Suppressant Placement**. Disponível em: <<https://community.wolfram.com/groups/-/m/t/3502932>>. Acesso em: 12 ago. 2025.

SCHUMACHER, M.; DICK, G.; MARIA, S. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS **INCÊNDIOS FLORESTAIS 3o edição -revisada**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/832/2020/12/CADERNO-DIDATICO_INCENDIOS-FLORESTAIS.pdf>.