

# Exploração de um Modelo de Espalhamento de Fogo com Autômatos Celulares Estocásticos

**Bruna D. G. Ribeiro, Caroline A. Cimenta, Lucas A. F. Lira, Paolla C. Camillo,  
Pedro P. Balbi**

Faculdade de Computação e Informática – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
(FCI – UPM)  
São Paulo – SP – Brasil

brudgr@gmail.com, carolcimenta@hotmail.com,  
lucas\_alf11505@hotmail.com, pcairo@live.com, pp.balbi@gmail.com

**Abstract.** *Burnings have been a worldwide concern due to their direct impact on climate change and the degradation of life on Earth, issues of such importance that they are among the seventeen UN Sustainable Development Goals for 2030. In line with this fact, the present study proposes a simplified qualitative model of fire propagation in a spatially delimited region. To this end, a stochastic cellular automaton was developed to analyze the temporal evolution of a two-dimensional region with an initial focus of fire. The model was tested in fictitious regions with different initial fire conditions, without wind and with wind in different directions, and later in a simplified image of the Horto Florestal of the city of São Paulo. The resulting model shows qualitative consistency, suggesting that it can serve as a basis for attempting to model a real fire situation.*

**Resumo.** *As queimadas têm sido fator de preocupação mundial devido a seu impacto direto nas mudanças climáticas e na degradação da vida terrestre, assuntos de tal importância que estão entre os dezessete objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU para 2030. Alinhado com esse fato, o presente estudo propõe um modelo qualitativo simplificado de propagação do fogo em uma região espacialmente delimitada. Para tanto desenvolveu-se um autômato celular estocástico para analisar a evolução temporal de uma região bidimensional com foco inicial de fogo. Testou-se o modelo em regiões fictícias com diferentes condições iniciais de fogo, sem vento e com vento em diferentes direções e, posteriormente, numa imagem simplificada do Horto Florestal da cidade de São Paulo. O modelo resultante mostra coerência qualitativa, sugerindo que ele possa servir de base para a tentativa de modelagem de uma situação real de fogo.*

**Palavras-chave:** *autômato celular, espalhamento de fogo, Wolfram Mathematica, Horto Florestal.*

## 1. Introdução

O número de queimadas aumentou nos últimos anos devido ao clima seco e o aumento das ações humanas em áreas florestais. De modo geral, as consequências geram de destruição do meio ambiente, como devastação de biomas, a problemas na saúde humana, ao se inalar gases poluentes e fumaças que são prejudiciais ao sistema respiratório. Entre

as principais causas de queimadas estão o descarte impróprio de bitucas de cigarros, balões, fogueiras, limpeza de terrenos (controladas ou não) e acidentes naturais como descargas elétricas causadas por raios. Nesse contexto, lugares como parques, florestas e outras áreas abertas que apresentam vegetação são possíveis vítimas desse desastre.

Segundo o site oficial do Governo Federal, a Casa Civil juntamente com diversos ministérios e órgãos federais vem estudando medidas para combater queimadas e desmatamento ilegal. Entre essas medidas, está o apoio de mais de três mil brigadistas que utilizam diferentes métodos para combater os incêndios [CASA CIVIL, 2021]. Porém, apesar de já utilizarem tecnologias atuais como inteligência artificial e drones, é imprevisível a direção em que o incêndio irá seguir, ou seja, os brigadistas enfrentam o fogo em tempo real.

O comportamento do fogo não é algo fácil de ser previsto, já que muitas características da região precisam ser consideradas ao pensar em formas para combatê-lo como o terreno, tipos de vegetação, velocidade e intensidade do vento, além de várias outras que podem ser consideradas, dependendo da região afetada, como por exemplo a existência de lagos ou de regiões urbanas. Devido à grande diversidade de biomas presentes no mundo, ou mesmo no país, faz-se necessário verificar de forma isolada como essas características plurais influenciam em cada região.

O objetivo geral do presente trabalho é emular o comportamento de um autômato celular estocástico bidimensional, no contexto do alastramento de uma queimada florestal no ambiente do Horto Florestal de São Paulo, comportamento este que será observado através da comparação da variação entre os estados do autômato celular em questão. Para tanto, precisa-se determinar transições de estado que o autômato celular seja capaz de executar sistematicamente, a partir de uma configuração inicial, o que foi implementado no software *Wolfram Mathematica*. O modelo será aplicado a uma área delimitada, sendo esta uma ilustração do mapa do Horto Florestal de São Paulo, a fim de emular o comportamento do fogo em região com obstáculos, como lagos e áreas acimentadas, como vias e pequenas construções.

O Horto Florestal de São Paulo é uma Unidade de Conservação da Mata Atlântica que possui 73,9 hectares abertos à visitação e está localizada em área urbana na zona norte da cidade de São Paulo [SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE, 2022]. Este parque foi escolhido por estar em área urbana diretamente ligada à Serra da Cantareira, compondo o Cinturão Verde da cidade, ter áreas impermeáveis como vias e pequenas construções e por possuir lagos, os dois últimos sendo características que podem influenciar diretamente no espalhamento do fogo. Estes atributos a tornam uma região com as características cujo modelo criado poderia ser aplicado para simulação de um incêndio.

O objetivo descrito foi inspirado no intuito de contribuir com a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que reúne uma sequência de objetivos sustentáveis, entre os quais: ação contra a mudança global do clima (13) e vida terrestre (15) [NAÇÕES UNIDAS, 2022]. Ambos visam assegurar, manter e desenvolver o ecossistema terrestre em estado sustentável, de forma a evitar e seguir medidas que proporcione e amenize perdas da biodiversidade.

Este trabalho é composto pelas seguintes 7 seções: a introdução, na qual se passa a contextualização do problema, visão geral do projeto e seus objetivos; o referencial teórico, que descreve pesquisas de base e trabalhos correlatos; o modelo proposto; a

metodologia de pesquisa, que explica o modo de pesquisa que foi utilizado para encontrar os referenciais do capítulo dois; os resultados obtidos com a aplicação do modelo; e o capítulo com as conclusões sobre o que foi verificado.

## 2. Referencial Teórico

Os autômatos celulares surgiram na década de 40, quando o matemático John von Neumann, iniciou o desenvolvimento de uma nova teoria geral relacionando os conceitos da biologia com a Teoria dos Autômatos, ciência que estava nascendo nessa época. O cientista, tinha como objetivo entender qual estrutura um autômato necessitava para conseguir se autorreproduzir [ANDRADE, et al. 2012].

Visto o surgimento dos autômatos celulares, podemos defini-los como um conjunto de unidades funcionais e estruturais, cujo principal aspecto é realizar uma ação local e distribuída, visando efeitos globais. Cada unidade, conhecida por célula, opera em espaço e tempo discretos, e assumem um estado de um conjunto finito, também discreto.

Por ser um reticulado regular de células,  $n$ -dimensional, cada uma possui uma vizinhança, ou seja, um conjunto de células vizinhas, cujos estados determinam a transição de estado da célula em questão, e todas as células do reticulado são alteradas simultaneamente conforme as regras de interação definidas [GUTOWITZ, 1991].

A execução de uma regra é diretamente associada com a probabilidade de que ocorra a transição no estado em uma célula central e em sua vizinhança. Em virtude da necessidade de uma ação variável para que as células possam alterar seus estados, os autômatos celulares são classificados como estocásticos ao invés de dinâmicos [VON NEUMANN, 1996].

Outros modelos baseados em mudanças de estado de uma célula e seu impacto ao redor em determinadas passagens de tempo também foram criados com objetivos mais específicos, como por exemplo o modelo SIR (*susceptible-infected-removed*), criado no início do século 20 por Sir Ronald Ross, e muito utilizado em modelos de espalhamento de doenças, e utilizado até hoje em estudos como a pandemia da Covid-19.

Um autômato celular bastante famoso é o Jogo da Vida, desenvolvido em 1970, pelo matemático britânico John Horton Conway, inspirado na evolução de vida e morte de uma colônia de seres vivos [LIMA e LIMA, 2014]. Além disso, o Jogo da Vida explora um espaço bidimensional baseado no conceito de vizinhança de Moore, definido por uma célula central e as oito vizinhas a seu redor.

Até então, os autômatos celulares eram utilizados para simular sistemas biológicos, porém a partir de 1980 Stephen Wolfram, passou a analisar padrões nos autômatos celulares de forma matemática, física e computacional. Até então, os autômatos celulares eram utilizados para simular sistemas biológicos, porém a partir de 1980 Stephen Wolfram, passou a analisar padrões nos autômatos celulares de forma matemática, física e computacional, tendo realizado muitos estudos, propondo regras mais generalistas para utilizar em programas simples de computador, mas também fazendo afirmações significativas sobre comportamentos complexos [WOLFRAM, 2002].

Em 1972, Rothermel desenvolveu o primeiro estudo matemático para modelar a propagação de incêndios utilizando autômatos celulares [LIMA e LIMA, 2014], o que serviu de base para o nascimento de diversos trabalhos com a temática. Alguns trabalhos

sequentes de Rothermel, vieram com evoluções no modelo, como por exemplo, Dilão em 1993, que considerou três estados possíveis para uma célula: viva, em chamas ou morta. Posteriormente em 1994, foi incrementado o conceito de vizinhança aleatória, e eventos reais, como a direção do vento, umidade do ar e temperatura [LIMA e LIMA, 2014]. Na Itália, por exemplo, foi desenvolvido um modelo de autômatos celulares estocástico chamado Propagator, criado para avaliar de forma rápida o risco de incêndios florestais, considerando tipos de vegetação, topografia, velocidade e direção do vento, além do ponto de ignição e a existência de algum combustível. A partir destes parâmetros e de dados de incêndios anteriores registrados na Itália e Espanha, simula a probabilidade do espalhamento do fogo analisando o processo célula a célula [TRUCCHIA, et al. 2020].

Há também, estudos que apresentam uma visão híbrida, considerando não apenas florestas ou áreas urbanas, mas buscando um modelo que cubra ambos, visto que muitas áreas afetadas por incêndios não são homogêneas e podem envolver, além dos danos florestais, danos a diversas construções, e inclusive acabar com um número considerável de mortes.

O modelo descrito em [JIANG, et al. 2021] utilizou autômatos celulares heterogêneos aplicado a diversos cenários, climas e locais com a finalidade de realizar a comparação entre seu modelo e o simulador FARSITE, utilizando como base comparativa os dados do incêndio ocorrido anteriormente em Getty, na Califórnia, mostrando acurácia aceitável, tempo de execução baixo e se mostrando capaz de fornecer insumos para permitir tomadas de decisão em casos de emergência.

No estudo realizado em [TURCI et al. 2019], o cenário foi o Parque Municipal da Serra de São Domingos, em Minas Gerais, que contém uma vegetação com 75% de mata atlântica, e altas variações do relevo, segundo a base do INPE. O objetivo foi utilizar autômatos celulares como sistema de desenvolvimento para as simulações, com o fim de comparar os incêndios dos dias 18 e 24 de setembro de 2017 com o modelo proposto. Para a aplicação do modelo foi definida como base a análise de [Almeida e Macau, 2011], que consiste nos seguintes quatro estados para a vegetação: E para a vegetação que não pega fogo, V para a que pode pegar fogo, F para a que está em incêndio e O para a que já foi consumida pelo fogo. Além disso, definiu-se três variáveis para a função de probabilidade: D para vegetação disponível na limitação do terreno, B quando a vegetação está em estado de combustão e I para o estado de ignição. Em outro estudo desenvolvido por [Almeida e Macau, 2011], não foi utilizado um cenário específico, mas sim um terreno plano, cujo não sofre influência do vento, além disso, o estudo definiu 3 tipos de estados para o consumo do incêndio, quais sejam: célula de vegetação, célula em chamas e célula queimada. Dessa forma, o estudo utilizou um modelo probabilístico com o auxílio de autômatos celulares estocásticos que realiza a análise das células e a simulação de sua estrutura, com células queimadas ou não, demonstrando de forma qualitativa a propagação do fogo.

### **3. Modelo Proposto**

O modelo computacional proposto tem por objetivo de emular o comportamento de um autômato celular estocástico bidimensional em uma simulação de espalhamento de fogo no parque Horto Florestal localizado na cidade de São Paulo.

A matriz bidimensional utilizada para esta simulação foi criada a partir da inserção de uma imagem do mapa do parque Horto Florestal, observada na figura 1, que passou

por um processo de quantização. Neste processo as cores da imagem são identificadas, agrupadas por suas cores principais, reagrupadas, dando origem a uma nova imagem a fim de reproduzi-la apenas com suas cores principais.

Neste estudo utilizamos a quantização em 3 camadas (verde, azul e cinza) identificadas na figura 2 e para identificar os principais estados encontrados no parque (vegetação, água e pedra). Em seguida, uma borda de cor amarela é agregada à imagem para delimitar a área analisada.



**Figura 1. Imagem do Horto Florestal. Fonte: URBIA, 2022**



**Figura 2. Matriz criada a partir da quantização da imagem com base na Figura 1. Fonte: Autores**

Após a etapa de inserção da imagem, quantização da imagem e construção da matriz, inicialmente com os estados iniciais possíveis aplicados a cada pixel (água, pedra, vegetação e borda), outros dois estados são criados, (vegetação) em chamas e (vegetação) queimada, referentes às mudanças de estado possíveis neste estudo. Cada um dos estados (água, pedra, vegetação, borda, em chamas e queimado) é representado por uma cor e valor e são caracterizados pelas cores azul, cinza, verde, amarelo, vermelho e preto e seus respectivos números 0, 1, 2, 3, 4 e 5, conforme figura 3 e 4, onde a figura 3 representa apenas os estados e a figura 4 os incluem na vizinhança de Moore, sendo assim:

- Azul possui o valor 0 e representa o estado *água*;
- Cinza possui o valor 1 e representa o estado *pedra*;
- Verde possui o valor 2 e representa o estado *vegetação*;

- Amarelo possui o valor 3 e representa o estado *borda*;
- Vermelho possui o valor 4 e representa o estado *em chamas*;
- Preto possui o valor 5 e representa o estado *queimado*.



**Figura 3. Estados representados por números e suas respectivas cores. Fonte: Autores**



**Figura 4. Estados representados na vizinhança de Moore. Fonte: Autores**

Dentro do perímetro delimitado, um ou mais pontos no estado *em chamas* podem ser gerados de forma aleatória, que são as células iniciais de ignição no reticulado. Outra forma de uma célula passar para o estado *em chamas* é se em sua vizinhança houver outras neste estado.

Considerando que a variável principal condicionante do espalhamento do fogo em uma nova célula é a quantidade de seus vizinhos em chamas — de 0 a 8 — determinou-se uma probabilidade de combustão para cada valor, a fim de que a taxa de espalhamento não se desse de forma nem muito rápida e nem muito lenta, e tais valores foram obtidos através de experimentação computacional.

Para tanto, a função de propagação do fogo precisa se estabelecer com a probabilidade de uma célula se queimar de acordo com a quantidade de vizinhos que possui. Uma célula que esteja no estado de vegetação não queimada tem 12,5% (1/8) de chance de pegar fogo por cada célula vizinha que esteja queimando. Além disso, cada célula inflamada na vizinhança aumenta gradualmente a chance de que a célula central seja incendiada; dessa forma, uma célula com vários vizinhos queimando terá maior chance de entrar em chamas do que uma com apenas um vizinho. As condições para que uma célula permaneça no estado *em chamas* são definidas pela probabilidade de em sua vizinhança ter uma ou mais células pegando fogo. Importante ressaltar que uma célula só pode prosseguir para o estado *em chamas* se ela estiver em *vegetação*, pois caso esteja em algum outro estado considerado fixo (água, pedra e borda) não poderá transitar entre eles.

Posteriormente, formalizou-se a relação entre cada valor de quantidade de vizinhos em chamas e sua probabilidade associada à extinção do fogo segundo a seguinte equação linear

$$Q = L + T \times V$$

em que Q representa a probabilidade de se entrar no estado *queimado*; L significa o valor máximo que uma célula pode chegar enquanto está no estado em chamas; T é a taxa de

extinção do fogo, ou seja, o quanto pode-se aumentar o limite do fogo de acordo com  $V$  que simboliza a quantidade de vizinhos no *estado em chamas*.

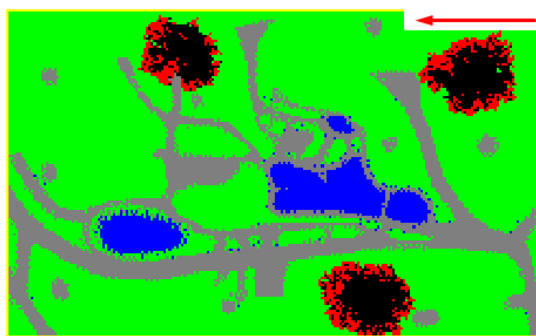
Sendo assim,  $L$  foi definido como 0.60 e  $T$  como 0.05. Dessa forma, por exemplo, na situação em que há apenas um vizinho no estado em chamas, tem-se que  $P = 0.60 + 0.05 \times 1$ . À medida que o fogo vai se espalhando e atingindo mais vizinhos, aumentando a quantidade de  $V$ , conseqüentemente o valor de  $P$  se eleva até atingir a probabilidade máxima, ou seja  $P = 1$  para a célula passar para o estado *queimado*.

Outro aspecto determinante na probabilidade e direção do espalhamento do fogo é a influência de vento, fazendo com que as chances de ignição das células vizinhas à célula em chamas aumentem de acordo com a direção de onde ele vem (Nordeste, Norte, Nordeste, Oeste, Leste, Sudoeste, Sul, Sudeste). Assim, como na Figura 5, se uma célula central estiver no estado *em chamas* e o vento estiver vindo do Norte, por exemplo, o fogo se espalhará com mais intensidade para o Sul, fazendo com que a probabilidade de seu estado ser alterado para *em chamas* seja potencializado. A fim de considerar o efeito do vento, definiu-se então a seguinte relação

$$P = V + D \times E$$

em que  $P$  representa a probabilidade de a célula entrar no estado *em chamas*;  $V$  simboliza a quantidade de fogo ao redor da célula central;  $D$  é o impacto do vento, no sentido de se considerar o alinhamento da direção do vento com a célula no estado *em chamas* e  $E$  é o percentual de influência do vento sob o fogo.

A partir disso,  $D$  pode assumir dois valores possíveis: 1 quando não houver presença de vento e 3 quando houver;  $E$  possui o objetivo de aumentar a intensidade da propagação do fogo, cujo valor definido para o estudo 0.05. Ambos os valores  $D$  e  $E$  são somados a  $V$  para potencializar a probabilidade de espalhamento em determinada direção contrária ao vento. Importante ressaltar que o vento foi adicionado ao modelo posteriormente, fazendo com que o valor de  $P$  possa ultrapassar 1.0 em casos cujo número de vizinhos em chamas seja igual ou superior a 7, pois o cálculo de  $V$  (fração da quantidade de vizinhos pegando fogo) pode por si só alcançar o valor de 1.0 mesmo sem a soma de influência do vento. Essa situação ocorre de forma implícita no modelo permitindo que mesmo com a influência do vento, o espalhamento para as demais direções ainda possa acontecer de acordo com  $V$ .



**Figura 5. Espalhamento do fogo com influência do vento partindo do Leste.**  
Fonte: Autores

Por fim, para que uma célula encerre seu ciclo de vida, a mesma precisa chegar no estado *queimado*, de forma que uma vegetação queimada não pode pegar fogo novamente. Para que isso ocorra, a célula precisa estar no estado *em chamas*, e sua chance de mudar para o estado *queimado* aumenta proporcionalmente ao número de vizinhos que também já não estiverem *em chamas*.

#### 4. Metodologia da Pesquisa

Quanto aos seus objetivos, a pesquisa pode ser classificada como exploratória [DAMY, 2002]. A primeira etapa explorada constituiu-se na busca dos principais conceitos utilizados para base de estudo, tais como surgimento e evolução dos autômatos celulares, e do mesmo modo, a busca por trabalhos correlatos que aplicaram tais conceitos na temática de espalhamento de fogo, podendo ou não ter modelo simulados em locais reais.

Na continuidade ao estudo, foi necessário definir ideias de comportamento das células, baseado nos conceitos estudados, para a criação de um modelo computacional no qual os autômatos celulares pudessem simular o espalhamento do fogo, e assim, seguir com o desenvolvimento lógico do estudo.

Por fim, implementou-se o modelo proposto no software *Mathematica*, utilizando sua linguagem de base, a *Wolfram Language*, e realizaram-se os experimentos e análises no alastramento do fogo numa versão simplificada do mapa do parque Horto Florestal de São Paulo.

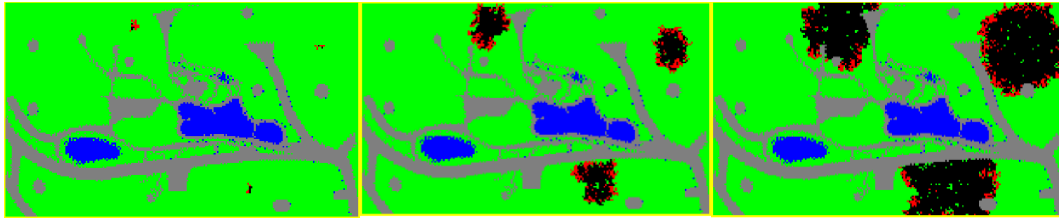
#### 5. Resultados

O primeiro ponto a ser observado se refere aos pontos de ignição, que por serem iniciados de forma aleatória podem iniciar em células que estão em estado fixo (*água e pedra*), porém essas faíscas iniciais em células cujo estado não permite propagação, são eliminadas na próxima iteração, ou seja, transformando seu estado em *queimado*, como ocorreria caso uma fagulha caísse em cimento ou água.

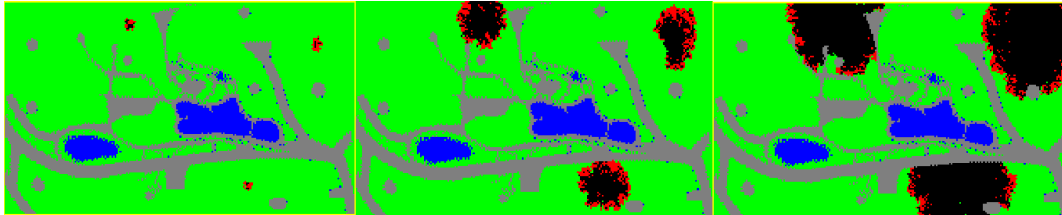
Nas Figuras 6 e 7, podemos analisar a propagação do fogo sob os mesmos pontos de ignição. No primeiro cenário, em que o vento não está presente, é possível observar que o fogo propaga de forma irregular em todas as direções, permitindo que o mesmo se espalhe para qualquer sentido de acordo com os critérios de probabilidade de uma célula no estado *vegetação* ser alterado para *em chamas* devido apenas a influência de seu estado e de seus vizinhos; inclusive nota-se que em algumas partes a queima não atinge a vegetação, mesmo estando rodeada de fogo.

Entretanto, na figura 7 percebe-se a existência do vento partindo do Sul, fazendo com que o fogo se propague mais facilmente para o Norte e de forma mais homogênea, ou seja, pelo aumento da probabilidade de uma célula ir para o estado *em chamas* há poucos pontos de vegetação entre o fogo.





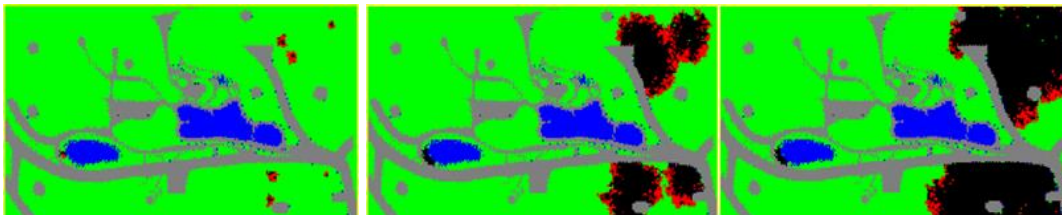
**Figura 6. Espalhamento do fogo sem influência do vento, time step 5, 25 e 50. Fonte: Autores**



**Figura 7. Espalhamento do fogo com influência do vento partindo do Sul, time step 5, 25 e 50. Fonte: Autores**

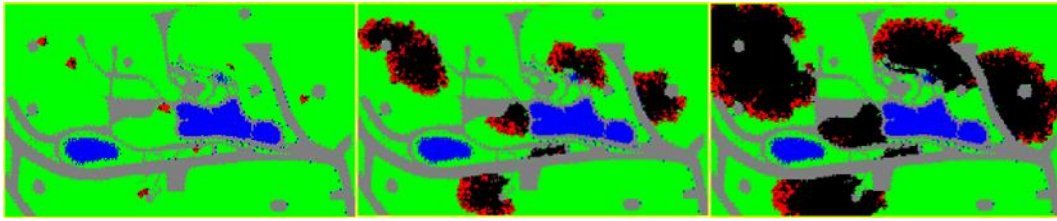
Importante observar que a influência do vento não extingue a possibilidade de que o fogo vá para as demais direções pois ainda temos vigente a regra da vizinhança, onde um vizinho possui a quantidade de vizinhos pegando fogo dividida pelos 8 vizinhos; porém, comparando as imagens acima, é perceptível que o vento potencializa as chamas na direção contrária à sua fonte, no caso, partindo do Sul em direção ao Norte.

Quando o vento entra em ação, neste caso vindo do Norte, como a Figura 8, nota-se que alguns pontos de ignição ao se propagar acabaram se juntando e que as células entram no estado *queimado* com mais facilidade. É possível observar também que células *em chama* que esbarraram com células no estado *pedra* e espalharam em outras direções. Ao invés de se intensificar para o Sul continuou para Leste.



**Figura 8. Espalhamento do fogo com influência do vento partindo do Norte, time step 5, 25 e 50. Fonte: Autores**

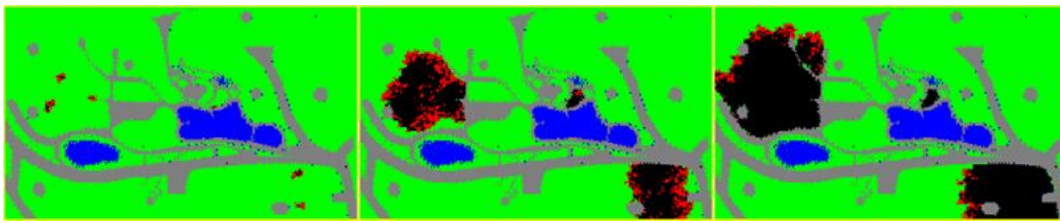
Assim como no cenário anterior, porém com o vento partindo de outras direções, neste caso para o Leste, na Figura 9, o mesmo comportamento pode ser observado na propagação, como o desvio das células em estados fixos e a intensificação na transição das células para o estado *queimado*.



**Figura 9. Espalhamento do fogo com influência do vento partindo do Leste, time step 5, 25 e 50. Fonte: Autores**

Outros dois aspectos podem ser observados em todos os cenários, mas se destacam na Figura 10 e se referem à propagação do fogo em direções contrárias ao vento. Neste cenário temos uma análise interessante: nota-se que apesar de o vento estar partindo do Oeste, quando ele colide com outros elementos acaba se alastrando para as demais direções, pois a influência do vento não estingue a possibilidade do fogo se espalhar na direção contrária.

Importante destacar que não consideramos a transposição de células cujos estados não se alteram, ou seja, a água e a pedra se tornam barreiras.



**Figura 10. Espalhamento do fogo com influência do vento partindo do Oeste, time step 5, 25 e 50. Fonte: Autores**

## 6. Conclusão

O trabalho proposto é composto pela construção de um modelo computacional capaz de realizar emulações de espalhamento de fogo a partir da inserção de uma imagem que é quantizada e onde posteriormente são incluídos um ou mais pontos de ignição para realizar uma simulação. O fogo criado se espalha pela matriz gerada, podendo encontrar em seu caminho obstáculos como células nos estados borda, água e pedra, ou ter seu potencial de espalhamento aumentado quando considerada a existência e direção do vento.

Os experimentos foram realizados utilizando uma imagem baseada no mapa do Horto Florestal de São Paulo. Importante destacar que a imagem continha todos os elementos relativos aos componentes que seriam avaliados, indicando que para modelos com outros estados não explorados, como a existência de diferentes tipos de vegetação, o modelo precisaria de melhorias.

Foi observado que os resultados alcançados foram próximos aos resultados esperados para a experimentação proposta, indicam que há potencial para pesquisas posteriores, como a detecção de *firebreakers* naturais; testes variando a velocidade do vento; proposição de incêndios controlados para contenção; geração da matriz de forma automática; inclusão de novos estados e ajustes de valores relativos à probabilidade da chama se espalhar e da influência do vento.

**Agradecimento:** P.P.B. agradece ao CNPq pela Bolsa PQ 305199/2019–6.

## Referências

- ALMEIDA, Rodolfo Maduro; MACAU, Elbert E. N.. Stochastic cellular automata model for wildland fire spread dynamics. *Journal of Physics: Conference Series*, São José dos Campos, SP - Brasil, v. 285, p. 1 - 9, 6 abr. 2011. DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/285/1/012038>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/285/1/012038#>. Acesso em: 20 set. 2021.
- CASA CIVIL. Governo Federal potencializa ações para o combate a queimadas e desmatamento ilegal. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2021/agosto/casa-civil-coordena-comite-de-queimadas-e-desmatamento>. Acesso em: 05 fev. 2022.
- CASTRO, Marcia; CASTRO, Reinaldo. Autômatos Celulares: Implementações de Von Neumann, Conway e Wolfram, [S. l.], ano 2028, v. 3, p. 94-96. Disponível em: [http://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo\\_thumb/Aut-matos-Celulares-Implementa--es-de-Von-Neumann--Conway-e-Wolfram.pdf](http://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo_thumb/Aut-matos-Celulares-Implementa--es-de-Von-Neumann--Conway-e-Wolfram.pdf). Acesso em: 01 out. 2021.
- GUTOWITZ, Howard. *Cellular Automata: theory and experiment*. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=6o6zx5MRRcQC&oi=fnd&pg=PR7&dq=automata+theory&ots=n30yRyfE5u&sig=aS0OnMPthgpn-Xgv2zjQUhLyi4A#v=onepage&q=automata%20theory&f=false>. Acesso em: 21 out. 2021.
- INFRAESTRUTURA MEIO AMBIENTE. Parque Estadual Alberto Lofgren. [S. l.]. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/cpp/pe-alberto-lofgren/>. Acesso em: 02 abr. 2022.
- JIANG, Wenyu; WANG, Fei; FANG, Linghang; ZHENG, Xiaocui; QIAO, Xiaohui; LI, Zhanghua; MENG, Qingxiang. Modelling of wildland-urban interface fire spread with the heterogeneous cellular automata model. *Environmental Modelling and Software*, [S. l.], ano 2021, v. 135, n. 104895, p. 1 - 15, 13 out. 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104895>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481522030952X>. Acesso em: 01 out. 2021.
- LIMA, Danielli; LIMA, Henrique. Autômatos celulares estocásticos bidimensionais aplicados à simulação de propagação de incêndios em florestas homogêneas. In: *WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (WCAMA)*, 5. , 2014, Brasília. Anais do workshop de computação aplicada à gestão do meio ambiente e recursos naturais. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2014 . p. 15-24. ISSN 2595-6124. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/wcama/article/view/10907>. Acesso em: 05 mar. 2022.
- NAÇÕES UNIDAS (Brasil). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil*. [S. l.]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 30 maio. 2022.

TRUCCHIA, Andrea; D'ANDREA, Mirko; BAGHINO, Francesco; FIORUCCI, Paolo; FERRARIS, Luca; NEGRO, Dario; GOLLINI, Andrea; SEVERINO, Massimiliano. PROPAGATOR: An Operational Cellular-Automata Based Wildfire Simulator. *Fire*, [S. l.], ano 2020, v. 3, n. 26, p. 1 - 24, 6 jul. 2020. DOI <https://doi.org/10.3390/fire3030026>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6255/3/3/26#cite>. Acesso em: 30 out. 2021.

TURCI, Luiz Felipe Ramos; ALMEIDA, Rodolfo Maduro; SANTOS, Everton dos. Avaliação de modelo probabilístico de propagação de incêndios florestais utilizando autômatos celulares aplicado a pequenas áreas. *Ciência Florestal*, Santa Maria, RS - Brasil, v. 29, n. 4, p. 1685-1700, 10 dez. 2019. DOI <https://doi.org/10.5902/1980509831126>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/N7ggmRhZwJDvwwR79NbxwQr/?lang=pt#>. Acesso em: 13 jan. 2022.

URBIA. Parque Alberto Löfgren (Horto Florestal). [S. l.]. Disponível em: <https://urbiaaguasclaras.com.br/parques/parque-alberto-lofgren-horto-florestal/>. Acesso em: 12 out. 2022.

WOLFRAM, Stephen. *A New Kind of Science*. Champaign, IL: Wolfram Media, Maio 2002. 1197 p. ISBN 1-57955-008-8. Disponível em: <https://www.wolframscience.com/>. Acesso em: 8 dez. 2021.