

Incêndios florestais em Autômatos Celulares, simples e grandes queimadas

Vitor Hugo Patricio Louzada¹,

Wilson Castro Ferreira Jr.²,

DMA, IMECC – UNICAMP, 13.083-859, Campinas/SP.

Resumo. O presente trabalho abordará o problema dos incêndios florestais sob o ponto de vista da modelagem matemática em autômato celular, ou seja, quais coleções de regras simples provocam o comportamento observado na natureza? De posse dessas regras, procuramos estudar o surgimento, a propagação e a manutenção de queimadas de grande porte em nossa floresta de autômatos celulares. Os resultados apontam a necessidade de pequenas queimadas periódicas como forma de prevenção de grandes incêndios.

Palavras-chave: *Incêndios florestais; Autômatos Celulares; Comportamento do fogo.*

1. Introdução

Uma floresta queimando é uma coisa muito ruim. Animais morrendo, plantas virando cinza, aquele tom alaranjado no fundo da cena. Tudo muito maligno e nefasto, provocado aparentemente pela inescrupulosa ação do homem na natureza. No presente estudo, definimos incêndio florestal como a propagação descontrolada de fogo por uma região da floresta.*

¹v046958@dac.unicamp.br

²wilson@ime.unicamp.br

*Por detalhes de edição, as figuras aqui presentes estão impressas em preto e branco. Para versões em formato jpeg colorido, contacte o autor principal.

Mas quais são as causas de um incêndio? Que conjunto de fatores são necessários para que a área de uma floresta queime? Precisamos mesmo da ação humana para a ocorrência de uma queimada?

Rothermell (1972) realizou um pioneiro trabalho sobre a modelagem matemática da dispersão de um incêndio florestal. Seu trabalho consistia na descrição da propagação do fogo sobre uma região de combustíveis, a floresta. Atualmente, trabalhos como Sandberg et al. (2007), tentam agregar mais complexidade ao modelo de Rothermell (1972), adicionando tipos de combustíveis diferentes, tipos de florestas diferentes, para a propagação do fogo.

Inspirado nesses trabalhos é que entra nosso atual estudo. Tentaremos aqui expor uma perspectiva simples e de fácil análise sobre a propagação das queimadas e, quem sabe assim, facilitarmos a discussão do fenômeno.

2. Objetivos

A ferramenta escolhida foram os Autômatos Celulares. Um Autômato Celular (ver: Wolfram, 2002) é um conjunto de autômatos de estados finitos em que a mudança de estado de cada autômato é uma função dos estados da vizinhança. Através dessa modelagem esperamos então obter o comportamento desejado utilizando apenas regras de mudança de estados que, por serem simples, possuem um paralelo direto com a realidade.

A modelagem por autômatos celulares já foi utilizada em trabalhos anteriores (ver: Dunn e Milne, 2004). Neste trabalho, porém, estudaremos também o comportamento dos grandes incêndios florestais (ver: Romme e Despain, 1989), propagações incontroláveis de fogo que atingem proporções desastrosas, economicamente e ecologicamente.

3. Descrição do Autômato Celular

Sem perda de generalidade, nosso modelo considerará apenas uma rede de autômatos em formato de matriz bidimensional, em que a vizinhança de uma célula consistirá das 8 células a ela mais próximas. Além disso, nosso mundo será um toróide: a parte superior da matriz estará conectada com a parte inferior, assim como as partes laterais estarão interconectadas. Com essas considerações esperamos facilitar a implementação do modelo. Nossa rede então consistirá de uma matriz 100x100.

Por uma questão de nomenclatura, cada elemento da rede, um autômato celular, será designado por célula daqui em diante. A matriz onde são representados os autômatos será referenciada como “rede”.

Definimos os seguintes parâmetros para nosso modelo:

- QuantQueima = quantidade de pontos iniciais de queimada na rede.
- LQ = número de graduações de queima no sistema, em que a primeira graduação será 1. A graduação da queimada modela a idade da mesma, ou seja, a temperatura daquela região, um fator importante na propagação do fogo.
- LR = número de graduações para a idade de uma floresta, em que a primeira graduação será 1. A idade da floresta reflete a quantidade de matéria orgânica seca presente. Florestas mais antigas possuem um maior acúmulo de combustível pronto para a queima em oposição às jovens florestas.

O estado de cada célula será expresso pelo par (Tipo, Idade), em que

$$Tipo \in \{0, 1\}$$

e

$$Idade \in [1..Lim],$$

em que $Lim = LQ$, se $Tipo = 1$, ou $Lim = LR$, se $Tipo = 0$.

Esperamos obter os diversos comportamentos da queimada de uma floresta apenas através da mudança desses parâmetros.

Como representação gráfica do autômato celular, células triangulares representarão estados de tipo 1, fogo, enquanto quadrados serão células tipo 0, florestas. As diversas tonalidades de cinza simbolizarão as Idades de cada célula, em que o mais escuro, mais perto do limite de idade do seu respectivo tipo.

4. Regras

As regras de mudança de estado do sistema, aplicadas a todas as células em uma iteração, serão as seguintes:

- **Uma célula Tipo 1** se tornará uma célula Tipo 0 com Idade=1 se, na iteração anterior, sua Idade era igual a LQ. Caso contrário, a idade da célula será incrementada em 1, com o limite máximo estabelecido por LQ. Essa regra é a responsável pelo fim de um incêndio e o estabelecimento de uma jovem floresta em seu lugar.
- **Uma célula Tipo 0** se tornará uma célula Tipo 1 com uma certa probabilidade P, em que:

$$P = \frac{Idade}{LR} * \frac{MediaV}{LQ}.$$

MédiaV representa a média de idade das queimadas vizinhas à célula. Combinando esses dois fatores, pretendemos que a probabilidade de uma célula de floresta queimar seja maior com o aumento do calor dos vizinhos e da quantidade de matéria orgânica que ela possui.

5. Simulações

Para cada simulação a seguir teremos QuantQueima=1 e, todas as demais células, serão florestas em sua idade máxima.

5.1 Rede homogênea

Como primeiro teste, seja $LQ=3$ e $LR=3$. As figuras 1 e 2 representam algumas iterações (It^\dagger) da simulação.

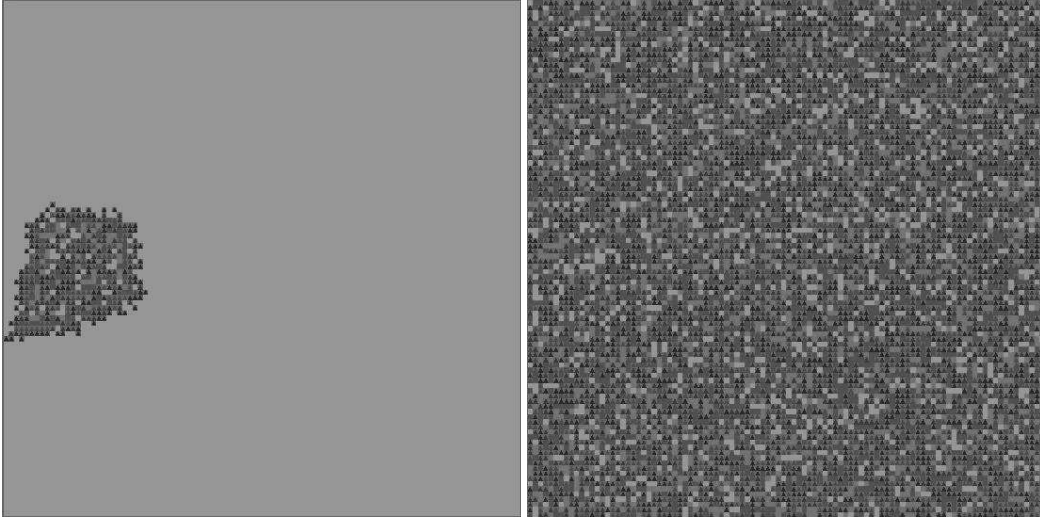


Figura 1: $LQ=3$, $LR=3$, $It=12$

Figura 2: $LQ=3$, $LR=3$, $It=71$

Nossos parâmetros modelam uma floresta com um pequeno ciclo de vida em contato com uma queimada de pouca duração. Árvores pouco resistentes a queimadas com um pouco acúmulo de combustível no ambiente. Como resultado, nossa simulação aponta uma uniformização na rede entre queimadas e florestas de diversas idades.

5.2 Longas queimadas

Seja $LQ=100$ e $LR=3$. As figuras 3, 4 e 5 representam algumas iterações da simulação.

Com uma queimada de grande duração e uma floresta com um curto ciclo de vida, as queimadas rapidamente dominaram toda a rede, como visto

[†]It é o número de iterações

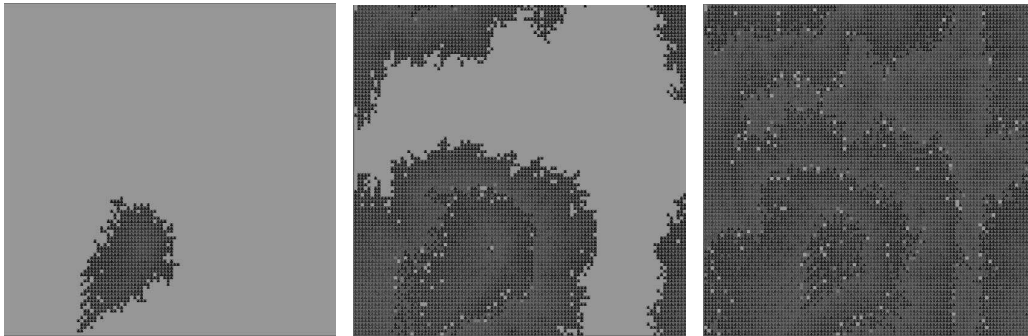


Figura 3: $LQ=100$, $LR=3$ e $It=65$ Figura 4: $LQ=100$, $LR=3$ e $It=200$ Figura 5: $LQ=100$, $LR=3$ e $It=460$

entre as figuras 3 e 4. A figura 5 representa o equilíbrio alcançado pela rede, com ondas de novas gerações de queimadas substituindo as antigas, sem espaço para a fixação de florestas. Esse cenário representa satisfatoriamente a continuidade de um incêndio em que muita matéria orgânica está disponível.

5.3 Antigas florestas

Seja $LQ=3$ e $LR=100$. As figuras 6 e 7 representam algumas iterações da simulação.

Na figura 6, as queimadas rapidamente limpam a floresta já em idade máxima presente inicialmente. Em seu lugar, as queimadas se extinguem após uma breve existência, deixando para trás um rastro de florestas novas.

A figura 7 representa o estado de equilíbrio encontrado pelo sistema. Uma concentração levemente superior de florestas em relação à de queimadas.

Nossa simulação agora exemplifica o comportamento de uma floresta que, quando jovem, apresenta pequenas chances de se incendiar mas que, com o passar do tempo, acaba por queimar. Esses parâmetros, portanto, demonstram ser os mais razoáveis para a descrição de uma verdadeira floresta e, por isso, vamos explorá-los mais.



Figura 6: $LQ=3, LR=100, It=75$

Figura 7: $LQ=3, LR=100, It=160$

5.4 Antigas florestas, pequenas queimadas

Seja $LQ=3$ e $LR=300$. As figuras 8, 9, 10 e 11 representam algumas iterações da simulação.

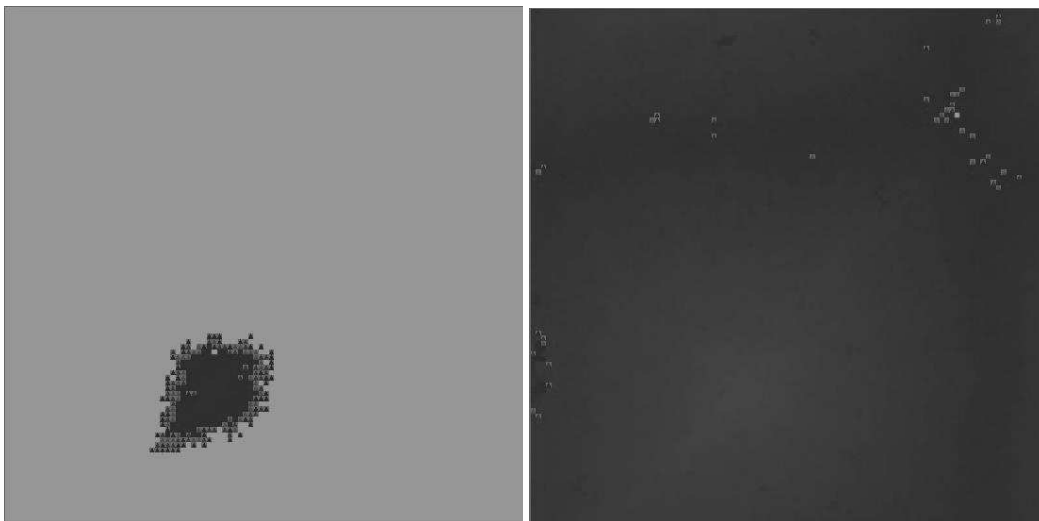


Figura 8: $LQ=3, LR=300, It=12$

Figura 9: $LQ=3, LR=300, It=65$

Com o aumento da idade limite das florestas, as queimadas rapidamente transformam a rede de florestas antigas em florestas novas, como expresso pelas figuras 8 e 9. Pela pequena probabilidade das novas florestas queimarem, a intensa onda de queima se extingue após percorrer todo o campo.

Esse comportamento modela muito bem grandes incêndios como de Yellowstone em 1988, (ver: Romme e Despain, 1989). Por muitos anos, a manutenção do parque apagou a maioria dos focos de incêndio que surgiam. Uma grande quantidade de matéria orgânica se acumulou. Em 1988, durante um tórrido verão, um incêndio se iniciou e rapidamente propagou-se por uma grande extensão do parque.

Nossa simulação indica que, para evitar esse tipo de propagação desastrosa, o mais recomendado é a manutenção de pequenos incêndios na floresta, impedindo o acúmulo de combustível.

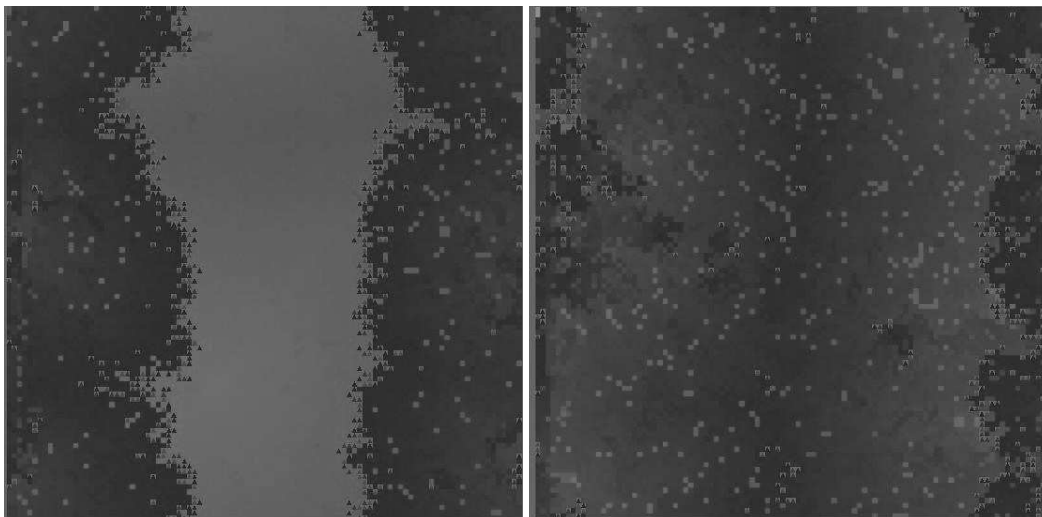


Figura 10: $LQ=3, LR=300, It=133$ Figura 11: $LQ=3, LR=300, It=280$

As figuras 10 e 11 representam o estado de equilíbrio do sistema. Após o incêndio inicial, algumas poucas células de queima sobrevivem. Com envelhecimento gradual das florestas circundantes, os focos restantes se propagam

novamente. Esse comportamento dá-se de forma cíclica: poucos focos de incêndio, uma onda de queima de porte médio percorre a rede, apagamento da maioria dos focos e sobrevivência de alguns poucos focos novamente.

Esse comportamento cíclico pode ser um modelo para o funcionamento da região de Yellowstone antes do estabelecimento do parque e controle humano, com ciclos de incêndio periodicamente ocorrendo para queimar a matéria orgânica e abrir espaço para novas florestas.

Para valores maiores de LQ, os focos de queima se apagam totalmente após o incêndio inicial. Contornando esse problema e, motivados em entender esse comportamento cíclico, é que propomos a próxima simulação.

5.5 Antigas florestas e combustão espontânea

Seja por intervenção humana ou por simples falta de chuvas, é natural pensar que, em uma floresta, queimadas se iniciam espontaneamente. Por isso, acrescentamos o seguinte parâmetro ao nosso modelo:

- PExp = probabilidade de, em uma determinada iteração, uma, e apenas uma, célula tipo 0 no campo se tornar célula de tipo 1.

A escolha da célula para queima ocorre aleatoriamente, e a probabilidade de uma célula tipo 0 x ser selecionada é:

$$P(x = Escolhida) = \frac{Idade(x)}{LR}$$

Esperamos, com essa regra, resolver o problema do fim dos focos de queimadas da simulação anterior.

Seja LQ=3, LR=500 e PExp = 1/1000. As figuras 12 e 13 representam algumas iterações da simulação.

Seguindo as indicações da última simulação, uma queimada rapidamente se ocupa da floresta e à substitui por células tipo 0 com pouca idade. Os focos de queimada se extinguem. No entanto, a regra que acabamos de

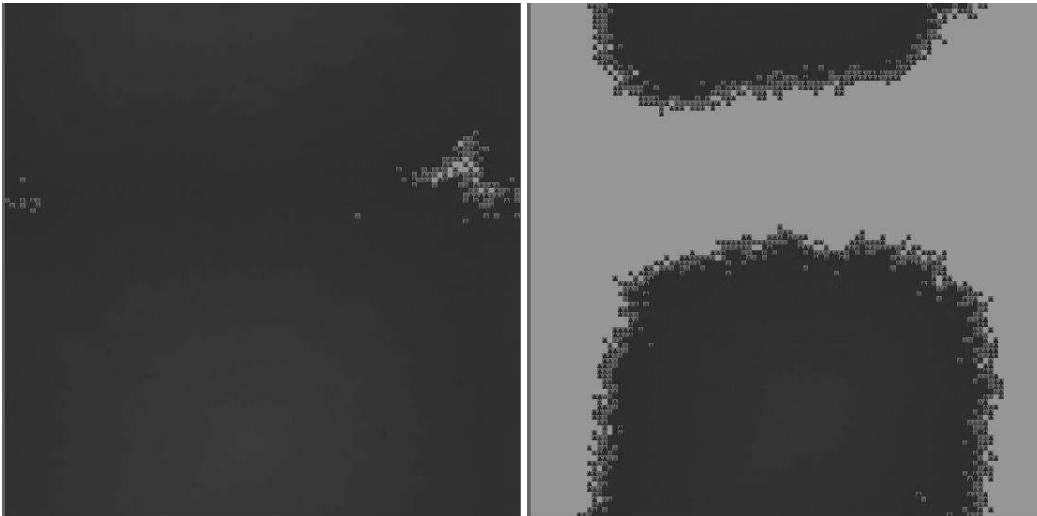


Figura 12: $LQ=3, LR=500, It=70$ Figura 13: $LQ=3, LR=500, It=618$

incrementar no modelo introduz um novo foco de queimada no sistema periodicamente. Criamos então um novo ciclo: surgimento de um foco, grande incêndio, nova floresta, fim dos focos, surgimento de um novo foco.

Entretanto, esse ciclo não se mostrou estável. Algumas iterações à frente, percebemos que, em um determinado momento, o grande incêndio não se apaga totalmente. E esses focos remanescentes conduzem o sistema ao ciclo da simulação anterior: poucos focos, incêndio de médio porte, poucos focos. Como percebemos nas figuras 14 e 15

Experiências com valores maiores para LR apenas aumentaram a estabilidade do primeiro ciclo, embora não o suficiente para evitar que, eventualmente, o sistema degenerasse para o ciclo com a presença constante de queimadas.

6. Conclusões

Superficialmente podemos pensar que queimadas em florestas são fenômenos ruins e que devem ser evitadas a todo custo. No entanto, estudos sobre a

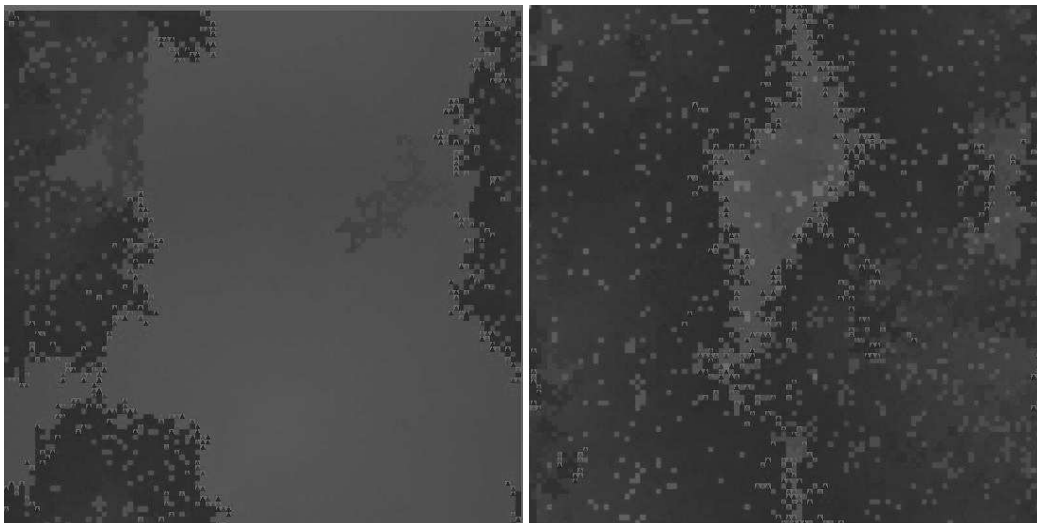


Figura 14: LQ=3,LR=500, It=783 Figura 15: LQ=3,LR=500, It=1122

modelagem de queimadas indicam a dificuldade na obtenção de resultados sobre a propagação de incêndios, além de, muitas vezes, apontarem efeitos benéficos para a realização de queimadas.

Nosso trabalho corrobora essas indicações, expressando claramente que o acúmulo de matéria orgânica, combustível, provoca grandes incêndios e que, por isso, pequenas queimadas são necessárias ao ecossistema.

Podemos perceber também como um sistema em que novos focos podem aparecer aleatoriamente caminha para um estado cíclico com poucos focos e eventuais incêndios de médio porte. Uma indicação interessante sobre o funcionamento de uma floresta sem a interferência humana.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Matemática Aplicada do IMECC-Unicamp pelo apoio e à fundação Nerv pelo incentivo.

Referências

- Dunn, A. e Milne, G. (2004). *Modelling Wildfire Dynamics via Interacting Automata*, volume 3305 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin/Heidelberg.
- Romme, W. e Despain, D. (1989). Historical perspective on the yellowstone fires of 1988. *BioScience - American Institute of Biological Sciences (USA)*, 39(10):695–699.
- Rothermell, R. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *Repository of U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station*, INT-115:40.
- Sandberg, D. V., Riccardi, C. L., e Schaaf, M. D. (2007). Reformulation of rothermel's wildland fire behaviour model for heterogeneous fuelbeds. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(12):2438–2455.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.