57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

MODELAGEM UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES APLICADOS À SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIOS EM FLORESTAS HETEROGÊNEAS

Jeremias Pinheiro de Araújo Andrade
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário Lagoa Nova, Natal - RN, 59078-900
jeremias.pinheiro.703@ufrn.edu.br

Matheus da Silva Menezes
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário Lagoa Nova, Natal - RN, 59078-900
matheus.menezes@ufrn.br

Anderson Carlos da Silva Morais
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
R. Francisco Mota, 572 - Pres. Costa e Silva, Mossoro - RN, 59625-900
anderson.morais92395@alunos.ufersa.edu.br

Ramon Cândido Jales de Barros
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário Lagoa Nova, Natal - RN, 59078-900
ramon.jales.700@ufrn.edu.br

José Eduardo Monteiro dos Santos
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário Lagoa Nova, Natal - RN, 59078-900
jose.santos.712@ufrn.edu.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo computacional de propagação de incêndios em florestas heterogêneas, baseado em sistemas multiagentes e utilizando autômatos celulares. O modelo leva em consideração diferentes tipos de vegetação, direções e velocidades do vento para as simulações e testes. São incorporadas características específicas de inflamabilidade de vegetações associadas a espécies nativas do extremo sul da América do Sul. O objetivo é identificar aspectos de influência na propagação de incêndios florestais com diferentes tipos de vegetação, bem como os seus comportamentos em diferentes cenários. O modelo proposto fornece uma alternativa para o auxílio do estudo e tomada de decisões no combate a incêndios florestais.

PALAVRAS CHAVE. Autômatos celulares, Incêndios florestais, Sistemas multiagentes.

Tópicos (SIM, AG&MA)

ABSTRACT

https://proceedings.science/p/212235?lang=pt-br

This work presents a computational model for wildfire propagation in heterogeneous forests, based on multi-agent systems and using cellular automata. The model takes into account different types of vegetation, wind directions, and wind speeds for simulations and tests. It incorporates specific flammability characteristics of vegetation associated with native species from the southernmost regions of South America. The goal is to identify influential aspects in wildfire spread across different vegetation types, as well as their behaviors under various conditions. The proposed model provides an alternative to aid in the study and decision-making in combating forest fires.

KEYWORDS. Cellular automata. Forest fires. Multi-agent systems.

Paper Topics (SIM, AG&MA)

https://proceedings.science/p/212235?lang=pt-br

1. Introdução

Os incêndios florestais representam uma das formas mais severas de destruição do meio ambiente. As consequências desses fenômenos impactam de forma rigorosa diversas áreas da sociedade. A complexidade de fatores que permeiam os incêndios torna difíceis os estudos sobre o comportamento desses fenômenos. Nesse sentido, modelos computacionais e matemáticos têm se mostrado ferramentas úteis para esse processo, permitindo a simulação de diferentes cenários e avaliação de estratégias de contenção de danos.

O modelo matemático proposto em [Rothermel, 1972] tem como objetivo a previsão da velocidade de propagação da linha de frente de um incêndio frente a uma vegetação natural, considerando elementos como as características dos combustíveis, as condições ambientais e as transferências de calor no ambiente. A partir desse modelo, surgiram diversos sistemas operacionais de simulação da propagação de incêndios florestais, como em [Finney, 1995], que combina modelos físicos e empíricos para prever o comportamento espacial e temporal do fogo.

Sendo assim, vê-se a importância do desenvolvimento de modelos que busquem modelagens cada vez mais reais e fidedignas que consigam simular a propagação de incêndios florestais, com a finalidade de ajudar na tomada de decisões no enfrentamento destes fenômenos. Nesse contexto, a utilização de sistemas multiagentes tem se mostrado eficiente para a modelagem desses problemas, uma vez que o comportamento dos agentes é utilizado na implementação do sistema e não se faz necessário o uso de equações diferenciais [Wooldridge, 2009]. A incorporação dos sistemas multiagentes pode ser implementada utilizando autômatos celulares. Essa implementação tem sido utilizada em diversos trabalhos, como em [Morais, 2024], na modelagem da disseminação de doenças.

O presente estudo propõe um modelo de simulação da propagação de incêndios florestais baseado em autômatos celulares, em sistemas multiagentes e nas modelagens do comportamento de incêndios florestais, incorporando três tipos de vegetação com níveis distintos de inflamabilidade e um sistema parametrizado de vento.

2. Fundamentação Teórica

Nesta seção, serão apresentados os conceitos fundamentais para desenvolvimento do trabalho: os autômatos celulares e suas aplicações, os sistemas multiagentes e seus conceitos, os elementos de influência em incêndios florestais e, por fim, uma breve revisão de modelos já desenvolvidos de simulação da propagação de incêndios florestais baseados em autômatos celulares.

2.1. Autômatos Celulares

Os autômatos celulares (ACs) fazem parte de uma classe de modelos computacionais que foram desenvolvidos para o estudo de sistemas dinâmicos. Um autômato celular é definido através de um reticulado discreto, dividido em células, em que o estado de cada célula é influenciado pelo estado das células que estão à sua volta, suas vizinhas, a partir de regras probabilísticas e/ou determinísticas. Por conta da estruturação dos autômatos celulares, é possível simular fenômenos em que a localização espacial e a interação local são relevantes [Gutowitz, 1991]. Em simulações de ACs, o tempo é discretizado e a cada iteração (geração), todas as células atualizam seu estado simultaneamente, com base em regras de transição aplicadas a uma vizinhança.

Em ACs, a vizinhança é a característica que define como cada célula irá interagir com as demais. Esse conceito é essencial na definição de regras de transição e fronteira dentro de um sistema. Existem três principais tipos de vizinhança em autômatos celulares: a vizinhança de Von Neumann, que considera as quatro células vizinhas acima, abaixo, à direita e à esquerda da célula central; a vizinhança de Moore, que pode ser compreendida como a vizinhança de Von Neumann acrescentando os vizinhos diagonais da célula central; e a vizinhança de Moore estendida, que pode ser definida como a vizinhança de Moore de raio 2, conforme ilustradas na Figura 1.

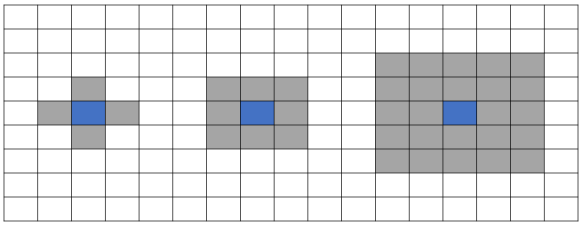


Figura 1: Vizinhanças de Von Neumann, Moore e Moore estendida, respectivamente.

As regras de transição são as condições necessárias para que ocorra a mudança de estado em uma determinada célula, essas regras levam em consideração os estados dos vizinhos da célula central. As condições de fronteira determinam a transição do estado de uma célula que está localizada nas extremidades do reticulado. Os principais tipos de condições de fronteira são: fixo, a vizinhança localizada na fronteira, ou fora dela, é definida como um estado fixo durante a simulação; periódico, a vizinhança localizada na fronteira, ou fora dela, é prolongada ao outro extremo; e reflexivo, a vizinhança localizada na fronteira, ou fora dela, é o reflexo do estado da célula.

2.2. Sistemas Multiagentes

Sistemas Multiagentes (SMAs) são uma abordagem computacional que leva em consideração a interação de múltiplas entidades autônomas, os agentes, que operam em um ambiente compartilhado. Um agente é qualquer entidade que, percebendo o seu ambiente, age sobre ele de forma independente. Em um meio em que vários agentes coexistem e interagem entre si, surgem dinâmicas complexas caracterizadas como sistemas multiagentes. [Wooldridge, 2009].

Diferentemente de outros modelos, os sistemas multiagentes não utilizam equações diferenciais, o foco é na simulação do comportamento individual das entidades que compõem o sistema. A partir disso, a heterogeneidade, a localidade das interações e a emergência de padrões globais a partir das ações individuais se tornam fatores centrais do sistema. [Wooldridge, 2009]

2.3. Elementos de Influência em Incêndios Florestais

Um incêndio florestal superficial sempre é parte de um pequeno foco. Inicialmente, tende a se propagar para todos os lados, tendo em um segundo estágio sua forma alterada pela ação do vento. A radiação é a transferência de calor através do ar, em qualquer direção, sendo o principal fator de transferência de calor nos grandes incêndios florestais. [Motta, 2008].

O vento possui grande influência na propagação do fogo em incêndios florestais, pois ele alinha as chamas com o combustível, facilitando o pré-aquecimento da vegetação à frente da linha de fogo. Isso faz com que o fogo avance mais rapidamente na direção do vento, mais lentamente contra o vento, e em ritmo intermediário nas laterais. [Finney, 1995]. Os combustíveis florestais são materiais que estão disponíveis no meio ambiente e que podem entrar em ignição e queimar [Motta, 2008].

Analisando o comportamento frente ao fogo de espécies nativas de ecossistemas meridionais da América do Sul, 19% apresentaram baixa inflamabilidade, 23% foram consideradas com inflamabilidade leve, 14% moderada, 21% inflamável, 14% altamente inflamável e 9% extremamente inflamável [Toy-Opazo et al., 2024]. Nesse contexto, o modelo proposto nesse trabalho divide a floresta em três tipos de vegetação quanto à sua inflamabilidade: baixa, média e alta.

2.4. Modelos de Propagação de Incêndios Florestais Baseados em Autômatos Celulares

Os autômatos celulares (ACs) têm sido amplamente empregados na modelagem da propagação de incêndios florestais devido à sua simplicidade computacional e flexibilidade na incorporação de fatores ambientais. Diversos estudos buscaram superar limitações conhecidas dessa

abordagem, especialmente no que diz respeito à fidelidade geométrica da propagação do fogo e à representação precisa de condições ambientais variáveis.

Em [Karafyllidis e Thanailakis, 1997], foi proposto um modelo que se destacou por sua capacidade de representar a dinâmica do fogo em florestas tanto homogêneas quanto heterogêneas, incorporando diversos fatores como tipo e densidade da vegetação, topografia do terreno, condições climáticas e o fenômeno de transporte de brasas pelo fogo. Nesse estudo, foi constatado que a heterogeneidade das florestas afeta na propagação das chamas. Na representações de florestas heterogêneas, o modelo trabalha com matrizes auxiliares que guardam valores específicos de atributos ambientais.

Em [Lima e Lima, 2014], o modelo se baseia nos trabalhos de [Rothermel, 1972] e [Karafyllidis e Thanailakis, 1997]. O trabalho leva em consideração a direção do vento, a intensidade da chama, a direção do vento e a inflamabilidade, aplicados em florestas homogêneas. Nesse modelo, o vento foi um fator altamente influente na propagação do fogo, afetando diretamente a intensidade e a direção das chamas. O modelo MFFM apresentado por [D'Andrea et al., 2010] incorporou cenários de uso e cobertura do solo reais, permitindo avaliar regimes futuros de incêndio em diferentes biomas e contextos socioeconômicos.

Um dos desafios recorrentes é a distorção nas formas do fogo gerada pelas malhas regulares dos ACs. Para mitigar esse problema, [Trunfio et al., 2011] propuseram a introdução de uma aleatoriedade local nas direções de propagação, inspirada em modelos de fluxo de lava.

[Ghisu et al., 2015] redefiniram a velocidade de propagação com base em fatores de correção otimizados numericamente, o que reduziu distorções e manteve o baixo custo computacional típico dos ACs e efetuaram uma comparação entre seu modelo e simuladores tradicionais, demonstrando vantagens em termos de precisão e eficiência.

A abordagem estocástica também se destaca, como evidenciado no PROPAGATOR [Trucchia et al., 2020], um simulador operacional que integra dados de topografia, vegetação, umidade do combustível e estratégias de combate a incêndios, gerando mapas probabilísticos da área queimada com boa correspondência com eventos reais. De forma similar, [Freire e DaCamara, 2019] destacaram a importância de regras de propagação baseadas em vento para modelar episódios explosivos, enquanto [Tinoco et al., 2022] incluíram estados variados de intensidade de fogo e funções de recuperação da vegetação, aproximando o modelo das dinâmicas naturais.

Uma perspectiva recente foi introduzida por [Grieshop e Wikle, 2023], que propuseram uma abordagem bayesiana para AC estocásticos com dinâmica latente espaço-temporal, permitindo quantificação de incertezas nas previsões. [Li et al., 2023] desenvolveram um modelo regional para pastagens na Mongólia Interior, baseado em poucos dados meteorológicos e vegetativos, com foco em suporte à tomada de decisão em tempo real.

3. Metodologia

O presente estudo apresenta o desenvolvimento de um algoritmo computacional que permite a simulação da propagação de incêndios em florestas heterogêneas. Para isso, foi desenvolvido um modelo baseado em sistemas multiagentes que implementa a estrutura de autômatos celulares. O modelo propõe três estados possíveis para cada célula: suscetível (S), inflamada (I) e queimada (Q). São incorporados alguns dos fatores ambientais que influenciam na propagação de incêndios florestais: radiação (ρ), direção do vento (δ), velocidade do vento (κ) e a taxa de inflamabilidade (ω). Cada tipo de vegetação possui uma taxa de inflamabilidade base que é obtida a partir de uma matriz de preferências. Em [Schadschneider, 2001], a matriz de preferências indica uma maior preferência de uma partícula para uma determinada direção. Essa matriz também é implementada em [Lima e Lima, 2014], e foi de suma importância para a modelagem do vento.

Neste trabalho, foram implementadas duas velocidades de vento, $\kappa = 1$ e $\kappa = 2$. Cada velocidade implica num tipo de vizinhança diferente. Para $\kappa = 1$ é aplicada a vizinhança de Moore e para $\kappa = 2$ é aplicada a vizinhança de Moore estendida. Para cada tipo de vegetação, a influência dos vizinhos inflamados também é alterada, quanto maior a inflabilidade da vegetação de uma determinada célula, maior será a influência dos vizinhos sobre essa célula. Quando a velocidade do vento aumenta, a quantidade de vizinhos e as probabilidades de influência deles em relação à célula central também aumentam. É importante salientar que, no caso de $\kappa = 2$, apenas as células a favor do vento com raio 2 acumulam a probabilidade da célula central inflamar, contudo, todas as células contribuem para a radiação. A radiação que afeta uma determinada célula aumenta com base no número de gerações, tendo um valor base e um valor máximo diferentes para cada tipo de vegetação.

A taxa de inflamabilidade de uma célula c é definida a partir da equação $\omega_{\text{veg}} = \sum_{i=1}^{m} \rho_{\text{veg}_i}$, que representa o somatório das probabilidades de influências das células vizinhas de c. Para as diferentes direções do vento, basta rotacionar a matriz de preferências, como mostrado na Figura 2.

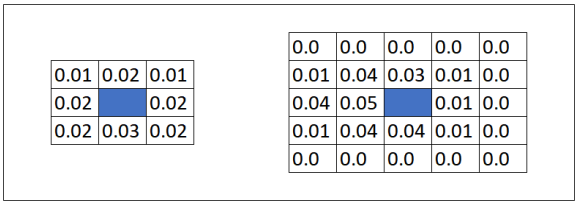


Figura 2: Matriz de preferências da vegetação de inflamabilidade média na velocidade 1 na direção norte e da vegetação de inflamabilidade alta na velocidade de vento 2 na direção leste, respectivamente.

Para a realização das análises a partir do modelo proposto, foram desenvolvidos seis cenários diferentes de simulação. As situações de teste foram realizadas considerado um tipo de cenário (dentre 6 cenários propostos), uma velocidade do vento (dentre 2 possibilidades) e uma direção do vento (considerando as orientações Norte, Sul, Leste e Oeste), contemplando 15 testes por situação. Ao todo, foram realizados 720 testes. Todos os testes realizados para este modelo aconteceram em um reticulado de dimensões 90 x 90. Para efeito de comparação entre as situações, a estabilidade é atingida quando o número de células inflamadas é nulo após mais de uma geração. Na Tabela 1, há uma breve descrição de cada cenário utilizado nos testes.

Tabela 1: Descrição dos cenários de simulação

Cenário	***I***	**Descrição**
1	1	um agente inflamado no centro do grid.
2	2	dois agentes inflamados equidistantes entre si no centro do grid.
3	3	três agentes inflamados equidistantes entre si no centro do grid.
4	4	quatro agentes inflamados no centro de cada quadrante do grid.
5	90	uma linha horizontal de agentes inflamados no centro do grid.
6	90	uma linha vertical de agentes inflamados no centro do grid.

Fonte: autoria própria.

A distribuição dos tipos de vegetação no modelo se dá em 40% de vegetação de baixa inflamabilidade, 35% de vegetação de média inflamabilidade e 25% de vegetação de alta inflamabilidade.

O modelo foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python, na versão 3.13, utilizando as bibliotecas *numpy*, *csv*, *os* e *matplotlib*. O desenvolvimento do algoritmo e a realização dos testes foram feitos em uma máquina com sistema operacional Windows 11 Home, processador Intel Core i5 11th, 8GB de memória RAM, 250GB de SSD NVMe e placa de vídeo Intel Iris Xe.

4. Resultados e Discussões

Como consequência dos resultados obtidos a partir dos testes desenvolvidos, foi possível realizar análises com a finalidade de estimar a influência dos fatores considerados e as diferenças entre cada situação de teste. Nas tabelas 2 e 3, observa-se os resultados de média, desvio padrão, mediana, número mínimo de células inflamadas e número máximo, além do coeficiente de variação (CV) correspondente aos cenários de 1 a 6, para cada velocidade de vento.

As tabelas 4 e 5 apresentam as médias MVB, MVM e MVA de inflamados, para as vegetações de inflamabilidade baixa, média e alta, respectivamente, bem como o número médio de gerações para a estabilidade do cenário.

Tabela 2: Métricas do total de queimados na velocidade 1 do vento

Cenário	I	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	CV
1	1	3287.68	2490.38	4787.50	1	5936	75.75%
2	2	4097.48	1991.90	4998.50	2	6116	48.61%
3	3	4585.55	1443.68	5095.50	3	6009	31.27%
4	4	4801.80	1341.45	5220.00	4	5926	27.94%
5	90	5099.85	597.95	5231.00	2720	5848	11.72%
6	90	5021.87	471.67	5039.00	3822	5859	9.39%

Fonte: autoria própria.

Na tabela 2, observa-se que há uma tendência na estabilidade do número de células queimadas à medida que o número inicial de células inflamadas no grid aumenta. Quanto maior o número de células inflamadas iniciais, maior é a média de células queimadas e menor é o desvio padrão e o coeficiente de variação. Além disso, percebe-se que nos cenários de 1 a 4, houveram situações em que o número mínimo de células queimadas foi igual ao número inicial de células inflamadas, ou seja, o fogo não se espalhou nesses casos, enquanto nos cenários 5 e 6, vê-se que em todos os testes o fogo se espalhou. Por outro lado, percebe-se que não houve uma diferença brusca entre o número máximo de células queimadas entre os cenários.

Tabela 3: Métricas do total de queimados na velocidade 2 do vento

Cenário	I	Média	Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	CV
1	1	5907.78	2354.05	6880.50	1	7073	39.85%
2	2	6593.38	1246.82	6856.00	2	7031	18.91%
3	3	6806.57	242.16	6866.00	5687	7070	3.56%
4	4	6819.32	132.83	6834.00	6366	7030	1.95%
5	90	6762.62	174.70	6816.00	6017	6978	2.58%
6	90	6770.15	196.59	6824.50	5663	7016	2.90%

Fonte: autoria própria.

Na tabela 3, percebe-se os mesmos padrões identificados na tabela 2 de maneira mais evidente. Na velocidade 2 do vento, as variações entre os cenários são muito pequenas a partir de

um certo ponto. Em todos os cenários, os valores de média, mediana e valor máximo de queimados são similares. Em relação à tabela 2, o número de casos em que o fogo não se espalhou, diminuiu, acontecendo somente nos cenários 1 e 2. É interessante perceber que a partir de um certo número inicial de células inflamadas, o desvio padrão e o coeficiente de variação deixam de diminuir. Do cenário 3 para o cenário 4, o CV diminui 1.61%. Porém, do cenário 4 para o cenário 5, o CV sobe 0.63%. O mesmo comportamento ocorre para o desvio padrão.

Tabela 4: Métricas do total de queimados por vegetação na velocidade 1 do vento

Cenário	I	MVB	MVM	MVA	Gerações
1	1	1148.88	1197.92	940.88	202
2	2	1434.90	1489.27	1173.32	245
3	3	1602.73	1674.47	1308.35	256
4	4	1681.58	1748.42	1371.80	251
5	90	1784.83	1858.72	1456.30	222
6	90	1756.93	1828.58	1436.05	210

Fonte: autoria própria.

Na tabela 4, é possível perceber que as médias de queimados para as vegetações de baixa e média inflamabilidade são muito parecidas, com as médias calculadas para a vegetação de inflamabilidade média sendo ligeiramente maiores. Apesar de existirem mais células de inflamabilidade baixa no grid, a maior inflamabilidade das células de inflamabilidade média fazem com que suas médias sejam maiores para a velocidade 1 do vento. Em termos de proporção, mais células de vegetação de inflamabilidade alta são queimadas. Inicialmente, parece que o número médio de gerações é diretamente proporcional ao número inicial de células inflamadas, porém, a partir de um determinado valor de I, o número médio de gerações volta a diminuir. Isso pode ser consequência do fato de que, como mais células são expostas e, consequentemente, são inflamadas e queimadas no início da simulação, o tempo de deterioração influencia no aumento, ou não, do número de gerações.

Tabela 5: Métricas do total de queimados por vegetação na velocidade 2 do vento

Cenário	I	MVB	MVM	MVA	Gerações
1	1	2175.68	2125.13	1606.97	207
2	2	2421.35	2373.82	1798.22	205
3	3	2502.87	2448.12	1855.58	205
4	4	2501.73	2457.37	1860.22	176
5	90	2476.20	2439.18	1847.23	169
6	90	2479.90	2444.52	1845.73	165

Fonte: autoria própria.

Na tabela 5, percebe-se alguns padrões distintos em comparação com a tabela 4. O número da média de queimadas para a vegetação de inflamabilidade baixa é ligeiramente maior se comparado ao da vegetação de inflamabilidade média. Nesse caso, prevaleceu a maior quantidade de células de inflamabilidade baixa no cenário. Na tabela 5 o número de gerações é inversamente proporcional aos valores de I, o que era esperado. Se na tabela 4 isso não acontecia por conta do tempo de deterioração das células, os dados da tabela 5 indicam que esse fator não foi tão impactante. Como a velocidade 2 do vento implica em uma maior suscetibilidade à inflamabilidade,

acelerando a propagação do incêndio, em valores maiores de I, mais células estarão expostas ao fogo ao mesmo tempo, fazendo com que o número de gerações diminua.

Os resultados apresentados nas Tabelas 6, e 7, referem-se as métricas dos cenários 5 e 6, respectivamente, para cada direção do vento e para cada velocidade do vento, onde as colunas MVBV_, MVMV_ e MVAV_ referem-se a média para vegetação de inflamabilidade baixa, média e alta, respectivamente, para cada velocidade do vento.

Tabela 6: Métricas do total de queimados por vegetação por direção do vento no padrão de cenário 5

Direção	MVBV1	MVBV2	MVMV1	MVMV2	MVAV1	MVAV2
Norte	1841.93	2472.07	1921.87	2443.00	1508.53	1842.67
Sul	1757.40	2477.13	1827.73	2429.33	1424.27	1846.27
Leste	1760.40	2491.80	1829.60	2461.00	1433.20	1856.00
Oeste	1779.60	2463.80	1855.67	2423.40	1459.20	1844.00

Fonte: autoria própria.

No padrão de cenário 5, temos uma linha horizontal de agentes inflamados no centro do reticulado. Sendo assim, teoricamente, deveria haver um favorecimento para as direções norte e sul, mas na prática, não é isso que acontece. Todos os valores são muito parecidos entre as direções, mesmo considerando o tipo de vegetação e a velocidade do vento. Nesse padrão, a radiação deve ter sido um fator predominante, já que a simulação inicia com várias células inflamadas, tornando propícia a troca de calor para as outras células no grid.

Tabela 7: Métricas do total de queimados por vegetação por direção do vento no padrão de cenário 6

Direção	MVBV1	MVBV2	MVMV1	MVMV2	MVAV1	MVAV2
Norte	1684.80	2494.13	1756.33	2456.20	1373.47	1851.53
Sul	1752.13	2474.60	1826.73	2432.73	1431.27	1839.53
Leste	1796.13	2492.20	1875.40	2463.67	1472.93	1857.67
Oeste	1794.67	2458.67	1855.87	2425.47	1466.53	1834.20

Fonte: autoria própria.

Semelhantemente à tabela 6, na tabela 7 esperava-se um favorecimento às direções leste e oeste, já que o padrão de cenário 6 é uma linha vertical no centro do grid. Contudo, assim como na tabela 6, os valores das médias entre as direções são similares. As direções leste e oeste apresentam médias ligeiramente maiores, mas nada que indique uma direção predominante. Mais uma vez, especula-se que a radiação deve ter sido um fator determinante para estes cenários, devido à quantidade inicial de células inflamadas.

Ao final das análises, percebe-se que a velocidade do vento possui forte influência no número de células inflamadas e, consequentemente, no número de células queimadas. Num contexto geral, os valores das médias na velocidade 2 do vento quase dobraram em relação aos valores das médias na velocidade 1 do vento. Proporcionalmente, mais células da vegetação de alta inflamabilidade foram queimadas, o que era esperado devido ao alto valor de inflamabilidade base desse tipo de vegetação. Além disso, é interessante perceber que a radiação teve forte influência nos números, podendo ser observada com mais clareza nos resultados das tabelas 6 e 7.

5. Considerações Finais

Neste trabalho, foi proposto um modelo baseado em autômatos celulares para simulação da propagação de incêndios em florestas heterogêneas, com foco na influência das direções e das

velocidades do vento, da radiação e das inflamabilidades dos diferentes tipos e vegetação sobre o comportamento do fogo. Os resultados mostraram que a configuração inicial do reticulado, as velocidades do vento e a radiação possuem impacto significativo tanto na quantidade total de células queimadas, quanto na distribuição temporal e espacial da propagação. O modelo se mostrou coerente com sua proposta, levando em consideração os parâmetros apontados e os diversos testes realizados.

Este trabalho possibilita análises futuras para o comportamento da propagação do fogo em reticulados de diferentes dimensões e cenários. Também é possível a implementação de mais elementos de influência em incêndios florestais, como fatores topográficos do local, umidade do ar e barreiras naturais, como bacias hidrográficas. Novas abordagens também são válidas, mudando o formato da vizinhança e os valores dos parâmetros aqui apresentados para modelagem de diferentes tipos de florestas. Uma abordagem sugerida para trabalhos futuros envolve a construção de modelos a partir dados reais obtidos por sensoriamento remoto e/ou a comparação dos resultados com eventos históricos de queimadas.

Referências

D'Andrea, M., Fiorucci, P., e Holmes, T. P. (2010). A stochastic forest fire model for future land cover scenarios assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(10):2161–2167. URL `https://nhess.copernicus.org/articles/10/2161/2010/`.

Finney, M. A. (1995). Farsite: a fire area simulator for fire managers. In Weise, D. R. e Martin, R. E., editors, *The Biswell Symposium: fire issues and solutions in urban interface and wildland ecosystems*, p. 55–56. Pacific Southwest Research Station, Forest Service, US Department of Agriculture, Albany, CA.

Freire, J. G. e DaCamara, C. C. (2019). Using cellular automata to simulate wildfire propagation and to assist in fire management. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19(1):169–179.

Ghisu, T., Arca, B., Pellizzaro, G., e Duce, P. (2015). An improved cellular automata for wildfire spread. *Procedia Computer Science*, 51:2287–2296.

Grieshop, N. e Wikle, C. K. (2023). Data-driven modeling of wildfire spread with stochastic cellular automata and latent spatio-temporal dynamics. *Spatial Statistics*, 59:100794.

Gutowitz, H. (1991). *Cellular Automata: Theory and Experiment*. MIT Press.

Karafyllidis, I. e Thanailakis, A. (1997). A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 99(1):87–97.

Li, Y., Wu, G., Zhang, S., Li, M., Nie, B., e Chen, Z. (2023). A novel method of modeling grassland wildfire dynamics based on cellular automata: A case study in inner mongolia, china. *International Journal of Geo-Information*, 12(12):474.

Lima, D. e Lima, H. (2014). Autômatos celulares estocásticos bidimensionais aplicados a simulação de propagação de incêndios em florestas homogêneas. In *Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais (WCAMA)*, p. 15–24. SBC.

Morais, A. C. d. S. (2024). Modelagem e simulação de disseminação de doenças baseado em autômatos celulares. Trabalho de conclusão de curso, UFERSA.

Motta, D. S. (2008). Identificação dos fatores que influenciam no comportamento do fogo em incêndios florestais. Trabalho de conclusão de curso, UFRRJ.

Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Technical report, Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture.

Schadschneider, A. (2001). Cellular automaton approach to pedestrian dynamics-theory. `https://arxiv.org/abs/cond-mat/0112117`. arXiv preprint cond-mat/0112117.

Tinoco, C. R., Ferreira, H. F., Martins, L. G. A., e Oliveira, G. M. B. (2022). *Wildfire Simulation Model Based on Cellular Automata and Stochastic Rules*. Springer International Publishing, Cham. ISBN 978-3-031-14926-9.

Toy-Opazo, O. et al. (2024). Flammability features of native and non-native woody species from the southernmost ecosystems: a review. *Fire Ecology*, 20(1):21.

Trucchia, A., Mirko D'Andrea, F. B., Fiorucci, P., Ferraris, L., Negro, D., Gollini, A., e Severino, M. (2020). Propagator: An operational cellular-automata based wildfire simulator. *Fire*, 3(3):26.

Trunfio, G. A., D'Ambrosio, D., Rongo, R., Spataro, W., e Gregorio, S. D. (2011). A new algorithm for simulating wildfire spread through cellular automata. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 22(1):1–26.

Wooldridge, M. (2009). *An Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons.