



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE FÍSICA – CCEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

REBECA CABRAL DE NOVAES

**EFEITOS DE INCÊNDIOS FLORESTAIS SOBRE A
DISTRIBUIÇÃO ETÁRIA EM FLORESTAS HETEROGÊNEAS**

Recife
2015

REBECA CABRAL DE NOVAES

**EFEITOS DE INCÊNDIOS FLORESTAIS SOBRE A
DISTRIBUIÇÃO ETÁRIA EM FLORESTAS HETEROGÊNEAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Física.

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Galvão Coutinho
Universidade Federal de Pernambuco

Co-Orientador:

Prof. Dr. Gustavo Camelo Neto
Universidade Federal de Pernambuco

Recife
2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Joana D'Arc Leão Salvador CRB4-532

N935e Novaes, Rebeca Cabral de.
Efeitos de incêndios florestais sobre a distribuição etária em florestas heterogêneas / Rebeca Cabral de Novaes. – Recife: O Autor, 2015.
105 f.: fig.

Orientador: Sérgio Galvão Coutinho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CCEN. Física, 2015.
Inclui referências.

1. Matéria condensada. 2. Autômato celular. 3. Incêndios florestais. 4. Sistemas biológicos. I. Coutinho, Sérgio Galvão (Orientador). II. Título.

530.41 CDD (22. ed.) UFPE-FQ 2015-31

REBECA CABRAL DE NOVAES

**EFEITOS DE INCÊNDIOS FLORESTAIS SOBRE A
DISTRIBUIÇÃO ETÁRIA EM FLORESTAS HETEROGÊNEAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Física.

Aprovada em: 30/07/2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sérgio Galvão Coutinho
Orientador
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gustavo Camelo Neto
Co-Orientador
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Pedro Valadão Carelli
Examinador Interno
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a Dr^a Carmen Pimentel Cintra do Prado
Examinadora Externa
Universidade de São Paulo

*Dedico este trabalho aos que acreditaram nele,
meus orientadores Sérgio Coutinho e Gustavo
Camelo Neto. Estendo a todos os demais que
perseveraram e nunca desistem de seus objetivos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos professores queridos que acreditaram em mim e no meu trabalho pois sem eles eu não teria conseguido finalizar a dissertação, Sérgio Coutinho e Gustavo Camelo Neto. Também pela enorme paciência comigo e por nunca desistirem de mim. A eles a minha mais profunda gratidão! Muito Obrigada!

A meus pais, Wellington e Neodalva, que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões e pelo amor incondicional dispensado em todas as fases de elaboração deste trabalho. Ao meu sobrinho Lucas Besse, por ser sempre tão amigo e presente.

Aos colegas do Departamento de Física da UFPE, aos amigos das disciplinas e congressos: Lidiane Araújo (mamãe), Priscila Silva, Marcus Figueirêdo (noites estudando pela internet), e aos tantos outros que estão espalhados pelo mundo ou que não se encontram mais nesse plano. Aos colegas da sala 234-C: Luis Fernando Muñoz e Luis Gutiérrez. À Ângela Mesquita por toda a ajuda e amizade nesse período, a todos os demais do LFTC e aos que passaram por lá e foram de suma importância para mim e para o desenvolvimento desta: Pedro Hugo Figueirêdo, Hallan Souza, Rogério Mendes, Washington Lima e Antônio Cruz.

Aos professores do Departamento de Física da UFPE: Mauro Copelli, Ernesto Raposo e Fernando Machado que fizeram parte desse momento mais de perto.

Ao professor Isaac de Melo Xavier Junior do departamento de Estatística da UFPE, meu primeiro orientador acadêmico, pela sua constante orientação, seu apoio e amizade.

Às amigas do Centro de Ciências Biológicas da UFPE (CCB-UFPE) que estiveram comigo em tantos momentos importantes para a finalização desta dissertação (minhas Biólogas queridas!!!): Thaís Costa, Liliane Lucena, Bárbara Alves, Aline Tenório, Pétulla Moura e Cynthia Cardone (Bacana).

Ao professor do CCB-UFPE e amigo Bruno Severo Gomes pela (super) paciência, apoio e amizade. Pela sua força para que esse trabalho fosse realizado, por me ouvir e aconselhar, e por ter sido de enorme importância em minha vida profissional.

Aos amigos de “fora” do meio acadêmico que foram importantes em toda essa longa etapa de minha vida, em especial a Queliane Carvalho, Bruno Roberto Mendes, Aurélia Cabral, Sabrina Cabral, Juliana Fialho e Bruna Soares (grande aluna e super amiga).

Aos funcionários do Departamento de Física da UFPE, em especial às funcionárias da secretaria de Pós-Graduação Alexsandra Melo e Hilda Santana.

Ao CNPQ e FACEPE pelo apoio financeiro.

A todos os demais que, embora não foram citados explicitamente, acreditaram em mim.

Finalmente e infinitamente a Deus. Pela dádiva da vida, por me dar tantas oportunidades e pelo seu amor eterno e incondicional. Sempre.

*“Foi o tempo que dedicastes à tua rosa
que a fez tão importante.”*

- Antoine de Saint-Exupéry -

RESUMO

Florestas em equilíbrio podem ser caracterizadas por uma distribuição espaço-temporal estacionária de espécies de árvores no que diz respeito à sua localização e idade. Porém, vários fatores externos, como pragas recorrentes, manejos florestais para extração de madeira e incêndios florestais, devem perturbar a dinâmica da evolução das populações de espécies de árvores, sobrepostos aos fatores topográficos e hidrológicos inerentes, bem como às variações climáticas sazonais.

Nesta dissertação, foram investigados os efeitos provocados por incêndios florestais ocasionais sobre a distribuição espaço-temporal das árvores em um ecossistema florestal. Para isso, foi proposto um modelo de autômatos celulares (AC) para descrever a propagação de incêndios em uma distribuição espacial de árvores com estrutura etária bem definida. Esse modelo leva em conta a taxa de envelhecimento das árvores quando os incêndios são causados por raios em uma escala de tempo longa quando comparada com o tempo característico para a regeneração da floresta.

No modelo proposto, os autômatos celulares estão associados com sítios de uma rede quadrada ($L \times L$) e podem estar em um de três estados possíveis: uma *árvore natural* (A), uma *árvore em chamas* (C) e uma *árvore queimada* ou *espaço vazio* (V). A idade das árvores está de alguma forma relacionada com a sua robustez à queima (ou a sua inflamabilidade) e determina o grau de resistência (ou facilidade) para ignição, de modo que as árvores mais jovens ou mais antigas, devem ser mais suscetíveis à queima do que aquelas na idade madura. Nesse modelo, o grau de resistência à ignição (ou inflamabilidade) de uma árvore natural (A), é definido pelo número mínimo de vizinhos R que são suficientes para uma árvore natural (A) tornar-se uma árvore queimando (C) no próximo passo de tempo.

A dinâmica do modelo AC é implementada pelas regras locais para alterar os estados dos autômatos, pela taxa de recuperação da população de árvores naturais p e pela probabilidade f de ocorrência de raios ou outra maneira ocasional de ignição de árvores. $1/p$ estabelece o tempo médio para brotamento de árvores e $1/f$, o intervalo de tempo médio entre a ocorrência de dois raios, fixando portanto a escala de tempo para a dinâmica do modelo.

O modelo AC foi aplicado para descrever e investigar os efeitos dos incêndios, no caso mais simples de florestas de uma única espécie, considerando o grau de resistência à ignição de cada árvore natural variando desde $R = 1$ até $R = 8$, dependendo da idade da árvore. Em particular, este estudo se concentrou no regime dinâmico, onde $p/f \rightarrow \infty$, quando a probabilidade de interação entre os incêndios é nula, e investigou as propriedades do estado estacionário da população de árvores, estimadas através de várias simulações e analisadas de acordo com os diversos parâmetros do modelo.

Os resultados obtidos indicam que a densidade de árvores evolui em largas escalas de tempo para um dos dois possíveis estados estacionários (atratores), independente da configuração inicial da distribuição de árvores. Para cada estado atrator, investigamos a distribuição espacial das árvores de acordo com a idade e inflamabilidade através dos respectivos histogramas das frequências, e calculamos a distribuição dos tamanhos dos incêndios. Os resultados mostram que um dos estados atratores da dinâmica, chamado de *floresta densa* (FD), é caracterizado por uma alta densidade de árvores (da ordem de 0,9), bem acima do limiar de percolação para esse modelo. Além disso, esse estado apresenta uma função de distribuição de tamanho de queimadas com decaimento exponencial típico, indicando que a presença de um número massivo de árvores adultas evita a propagação de grandes incêndios. Por outro lado, para certo conjunto de valores dos parâmetros, o

segundo estado atrator é alcançado, chamado aqui de *floresta savana* (S), caracterizado por uma baixa densidade de árvores muito jovens ($\approx 0,3$, abaixo do limiar de percolação) e exibindo um comportamento do tipo lei de potência para a função de distribuição de tamanhos de incêndios, permitindo a propagação de um grande número de incêndios extensos.

Em suma, a inclusão da correlação entre a idade das árvores e sua inflamabilidade no modelo de autômatos celulares proposto para descrever a propagação de incêndios florestais, mesmo em um ambiente de floresta mono-espécie, leva a uma possível transição de fase dinâmica entre o estado de floresta densa para o de uma savana. Um esboço desse diagrama de fases em função dos parâmetros do modelo é apresentado.

Palavras-chave: Incêndios Florestais. Autômatos Celulares. Idade de árvores.

ABSTRACT

Forested-lands at equilibrium can be characterized by a stationary spatiotemporal distribution of species of trees in respect of its location and age. But several external factors like the recurrent plagues, forest managements for harvesting of timber and wildfires, should perturb the dynamics of the evolution of the populations of tree species, superimposed to the inherent topographical and hydrological factors as well as the climate seasonal variations.

In this dissertation, the effects provoked by occasional wildfires over the spatiotemporal distribution of species of trees in a forest ecosystem was investigated. For this, a cellular-automata model (CA) was proposed to describe the spread of fire in a spatial distribution of trees with well-defined age structure. This model takes into account the aging rate of the trees when the fires are caused by lightnings, in long-time scale in comparison to the characteristic time for the forest regeneration.

In the proposed model, cellular automata are associated with sites of a square lattice ($L \times L$), and may be in one of three possible states: a *natural tree* (A), a *burning tree* (C) and a *burnt tree* or *empty space* (V). The age of the trees is somehow related to their robustness to burning (or to their flammability) and determines the degree of resistance (or facility) to ignition, so that much younger or older trees, shall be more susceptible to burning than those at the ripe age. In this model, the degree of resistance to ignition (or flammability) of a natural tree (A) is defined by the minimum number of neighbors R that are sufficient for a natural tree (A) to become a burning tree (C) in the next time step.

The dynamics of the CA model is implemented by the local rules for changing the states of the automata, by the recovery rate of the population of natural trees p and by the probability f of occurrence of lightnings or other occasional way of ignition of trees. $1/p$ provides the average time for budding trees and $1/f$ the average time interval between the occurrence of two lightnings, therefore fixing the time scales of the dynamics.

The CA model was applied to describe and investigate the effects of fires in the simplest case of single-species forests considering the degree of resistance to ignition of each natural tree ranging from $R = 1$ up to $R = 8$, depending on the age of the tree. In particular, this study focused on the dynamic regime where $p/f \rightarrow \infty$, when the probability of interaction between the fire is zero, and investigated the properties of the steady-state of the trees' population, estimated through various simulations and analyzed according to the various model parameters.

The results indicate that the density of trees evolves in large scales of time to one of two possible steady states (attractors), regardless of the initial configuration of the distribution trees. For each attractor state we investigate the spatial distribution of trees according to the age and flammability through the respective histograms of frequencies, and calculated the distribution of fire sizes. The results show that one of the *attractors* of the dynamic states, called *dense forest* (FD) is characterized by a high density of trees of the order of 0.9, well above the percolation threshold for this model. This state has a histogram of ages with approximately uniform distribution frequency in almost all classes, except for the one of the very young trees and those of the senescence period, which exhibit an exponential decay. In addition, it presents a typical exponential decay for the fire-size distribution function, indicating that the presence of a massive number of mature trees prevents the spread of huge fires. On the other hand, for certain set of the parameter values, the second attractor state is reached, here called *savana forest* (S), characterized by a low density of very young trees (≈ 0.3 , below the percolation

threshold), and exhibiting a power-law behavior for the fire-size distribution function, which allows the propagation of great number of large fires.

In short, the inclusion of correlation between the age of trees and its flammability in the cellular automata model proposed to describe the spread of forest fires even in a mono-species forest environment, leads to a possible dynamic phase transition between dense forest to a savanna forest state. An outline of the phase diagram according the model parameters is presented.

Keywords: Forest Fires. Cellular Automata. Trees' age.

Lista de Figuras

1.1	(a) Floresta temperada: <i>Western American Temperate and Inland Rainforests</i> ; (b) Floresta tipo savana: Porção de Cerrado Sentido Restrito localizado na Bahia, nas adjacências da Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins, TO.	22
1.2	Exemplares de sequóias. Em (a) a <i>General Sherman Tree</i> , uma <i>Sequoia dendron gigantea</i> do <i>Sequoia National Park</i> na Califórnia, maior árvore do mundo em volume segundo o Guinness book e possui mais de 2.000 anos de idade. Em (b) uma sequóia que foi modificada para a passagem de veículos, também no <i>Sequoia National Park</i>	24
1.3	Secção de um tronco mostrando os anéis de crescimento de acordo com as épocas em que foram criados.	25
1.4	Secção de tronco mostrando anéis de crescimento. Mais próximos à casca, os anéis se tornam cada vez mais finos.	26
1.5	Esquema do tronco de uma árvore, mostrando os anéis nos diferentes períodos de crescimento. (CAI = current annual increment, ou “incremento anual atual”).	27
1.6	Diagrama da robustez por idade para uma árvore genérica.	27
1.7	Distribuição de idades das árvores de uma floresta de carvalhos (<i>oak trees</i>).	28
1.8	Distribuições acumuladas de áreas queimadas em seis diferentes regiões florestais.	29
2.1	Dimensões da rede de um autômato celular. Estão representados os casos: (a) Unidimensional ($n = 1$); (b) Bidimensional ($n = 2$); (c) Tridimensional ($n = 3$).	38

2.2	Representação dos possíveis formatos de um autômato celular 2D. (a) A rede triangular ou hexagonal; (b) Quadrangular; (c) Rede Favô de mel.	38
2.3	Vizinhança de um autômato celular unidimensional onde a célula central a_0 é a célula inicial, e a vizinhança está definida pelas primeiras n células à direita e à esquerda, respectivamente.	38
2.4	Exemplos de vizinhanças mais utilizadas na rede quadrada. (a) von Neumann e (b) Moore. As células em amarelo são as células centrais (iniciais) e as em azul, suas vizinhas.	39
2.5	Vizinhanças originais e suas extensões (vizinhanças ampliadas). (a) Vizinhança de Neumann com $\mathcal{R} = 1$ (original); (b) Vizinhança de Neumann estendida com $\mathcal{R} = 2$; (c) Vizinhança de Moore com $\mathcal{R} = 1$ (original); (d) Vizinhança de Moore estendida com $\mathcal{R} = 2$;	40
2.6	Exemplo de uma vizinhança aleatória.	40
2.7	Condições de contorno periódicas para um autômato celular bidimensional.	43
2.8	Condições de contorno reflexivas para um autômato celular bidimensional.	44
2.9	Condições de contorno fixas para um autômato celular bidimensional.	44
2.10	Exemplos de imagens paradas do jogo da vida. Observamos em (a) o bote e em (b) o bloco.	46
2.11	Exemplo de estrutura que oscila. As configurações (a) e (b) se alternam. Essa estrutura é também conhecida como “ <i>blinker</i> ”.	46
2.12	Exemplo de estrutura que oscila. As configurações (a) e (b) se alternam. Essa estrutura é também conhecida como “ <i>sapo</i> ”.	46
2.13	Exemplo de evolução de um <i>glider</i> . A estrutura do exemplo se desloca para cima e para a direita (ou seja, diagonalmente) após quatro passos de tempo.	47
2.14	Exemplo de evolução de uma <i>spaceship</i> . A estrutura do exemplo se desloca para a esquerda após quatro passos de tempo.	47
2.15	Esquema de um estado inicial para um autômato celular cujo valor é dado por $(1,0,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0)$	48
2.16	Evolução do estado inicial representado na 2.15 após 20 passos. A primeira linha apresenta a configuração inicial e as seguintes, a evolução temporal, de cima para baixo, usando condições de contorno periódicas.	49
2.17	Evolução da regra 90 em 25 passos.	50

2.18	Evolução da regra 90 em 500 passos.	50
2.19	Evolução da regra 90 partindo de um estado inicial desordenado em 500 passos.	51
2.20	Representação de um autômato celular natural, observado nos <i>Conus textile</i>	52
2.21	Evolução da regra 30 partindo de um estado inicial desordenado.	52
2.22	Padrões espaço-temporais característicos de regras típicas em cada uma das quatro classes de Wolfram. (a) Classe I - Evolução da regra 160 em 250 passos; (b) Classe II - Evolução da regra 164 em 250 passos; (c) Classe III - Evolução da regra 146 em 250 passos; (d) Classe IV - Evolução da regra 110 em 250 passos.	53
2.23	Regras de (a) nascimento e (b) ignição expontânea.	56
2.24	Exemplo de evolução. As células em vermelho são sítios em chamas, em verde são árvores naturais com a resistência indicada. Células em branco representam espaços vazios. A evolução do sistema começa em (a) e evolui respectivamente para (b) e depois (c).	56
2.25	Gráfico do grau de resistência R em função do tempo τ para uma árvore, após o brotamento, para o caso particular do tempo de vida = $T_{vida} = 12\tau$	57
2.26	Captura da tela do programa com versão gráfica. Parâmetros utilizados: $\tau = 90$, $T_{vida} = 10\tau$, $p = 0,01$, $f = 0,0001$. As diferentes cores determinam os graus de resistência das árvores, exceto os sítios em vermelho que representam árvores em chamas e os sítios em branco que representam espaços vazios respectivamente.	60
2.27	Captura da tela do programa com versão gráfica. Parâmetros utilizados: $\tau = 30$, $T_{vida} = 10\tau$, $p = 0,01$, $f = 0,0001$. Há uma grande diversidade de árvores com diferentes graus de resistência na floresta mostrada pela figura.	61
2.28	Capturas da tela do programa com versão gráfica. Parâmetros utilizados: $\tau = 80$, $T_{vida} = 10\tau$, $p = 0,01$, $f = 0,0001$. Em (a) está representada a rede em um dado instante e em (b), (c), (d), (e) e (f) em instantes posteriores a (a), estando em ordem temporal crescente.	62

2.29	Capturas da tela do programa com versão gráfica. Parâmetros utilizados: $\tau = 50$, $T_{vida} = 10\tau$, $p = 0,01$, $f = 0,0001$. Em (a) está representada a rede em um dado instante e em (b) a rede em um instante posterior ao mostrado em (a).	63
3.1	Evolução temporal da densidade de árvores na floresta para quatro diferentes valores de resistência. Parâmetros: $p/f = 10^5$ e $q = 0.5$. Rede com $L = 20.000$	68
3.2	Gráfico do grau de resistência R em função do tempo τ para uma árvore, após o brotamento, para o caso particular onde a resistência alcança seu valor máximo ($R = 8$) e assim permanece.	69
3.3	Evolução da densidade de sítios para os diferentes valores de resistência ao longo de cada iteração no modelo sem decaimento da resistência e numa rede com $L = 5.000$ para $T_{max} = 20.000$ passos MC. Parâmetros: $\tau = 70$, $p = 0,01$ e $f = 0,0001$	70
3.4	Evolução da densidade de sítios para os diferentes valores de resistência ao longo de cada iteração no modelo sem decaimento da resistência e numa rede com $L = 5.000$ $T_{max} = 20.000$ passos MC. Parâmetros: $\tau = 80$, $p = 0,01$ e $f = 0,0001$	70
3.5	Evolução da densidade de sítios para os diferentes valores de resistência ao longo de cada iteração no modelo sem decaimento da resistência e numa rede com $L = 5.000$ $T_{max} = 20.000$ passos MC. Parâmetros: $\tau = 90$, $p = 0,01$ e $f = 0,0001$	71
3.6	Evolução da densidade de sítios para os diferentes valores de resistência ao longo de cada iteração no modelo sem decaimento da resistência e numa rede com $L = 5.000$ $T_{max} = 20.000$ passos MC. Parâmetros: $\tau = 100$, $p = 0,01$ e $f = 0,0001$	71
3.7	Parte central da Rede (com $L = 500$ originalmente). R são as resistências e estão apresentadas na legenda da figura. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 90$ e $T_{max} = 20.000$. Nesse caso, não há decaimento de R na senescência.	72

3.8	Parte central da Rede (com $L = 500$ originalmente). R são as resistências e estão apresentadas na legenda da figura. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 100$ e $T_{max} = 20.000$. Nesse caso, não há decaimento de R na senescência.	73
3.9	Evolução da densidade de sítios em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$, $T_{vida} = 16\tau$	74
3.10	Evolução da densidade de sítios em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 70$, $T_{vida} = 10\tau$	75
3.11	Evolução da densidade de sítios em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$, $T_{vida} = 10\tau$	75
3.12	Evolução da densidade de sítios até $T_{max} = 150.000$ em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 97$, $T_{vida} = 10\tau$	76
3.13	Evolução da densidade de sítios em uma rede com $L = 5.000$ para: (a) $\tau = 96$, (b) $\tau = 97$ e (c) $\tau = 98$. Outros parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $T_{vida} = 10\tau$	77
3.14	Densidades de sítios no estado estacionário (após $T_{max} = 75.000$ passos MC) em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$ e $T_{vida} = 10\tau$	78
3.15	Densidades de sítios no estado estacionário (após $T_{max} = 150.000$ passos MC) em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$ e $T_{vida} = 10\tau$	79
3.16	Densidade de sítios até $T_{max} = 150.000$ passos MC. Parâmetros: $L = 5.000$, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $T_{vida} = 10\tau$	80
3.17	Diagrama de fases para Floresta Densa e Savana em $T_{max} = 75.000$ passos MC.	81
3.18	Histograma de Idades após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 1.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$, $T_{vida} = 10\tau$	83
3.19	Histograma de Idades após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 1.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 97$, $T_{vida} = 10\tau$	84
3.20	Histograma de Idades após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 1.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 98$, $T_{vida} = 10\tau$	85

3.21	Histograma de Idades após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 1.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $T_{vida} = 10\tau$	86
3.22	Histograma de Idades após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 1.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$	87
3.23	Distribuição de Tamanhos de Incêndios após $T_{max} = 50.000$ passos MC em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $T_{vida} = 10\tau$	89
3.24	Correlação Resistência \times Idade após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $T_{vida} = 10\tau$. Em (a) $\tau = 96$; (b) $\tau = 97$; (c) $\tau = 98$	91
3.25	Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). Sítios em verde estão ocupados com árvores, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$	92
3.26	Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). Sítios em verde estão ocupados com árvores, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 97$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$	93
3.27	Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). Sítios em verde estão ocupados com árvores, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 98$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$	94
3.28	Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). R são as resistências e estão apresentadas na legenda da figura, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$	95
3.29	Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). R são as resistências e estão apresentadas na legenda da figura, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 97$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$	96
3.30	Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). R são as resistências e estão apresentadas na legenda da figura, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 98$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$	97

Sumário

1	Introdução	20
1.1	Os Sistemas Florestais	20
1.1.1	A Idade das Árvores	23
1.2	Os Incêndios Florestais	28
1.2.1	Metodologias de estudo de Incêndios Florestais	30
1.3	Organização da dissertação	32
2	Modelos de Autômatos Celulares para Incêndios Florestais	33
2.1	Autômatos Celulares	34
2.1.1	Breve Histórico	34
2.1.2	Definições	36
2.1.3	Geometria	37
2.1.4	Vizinhança	38
2.1.5	Regras de Transição	41
2.1.6	Condições de Contorno	42
2.1.7	Exemplos de Autômatos Celulares	45
2.2	Modelo Proposto para Incêndios Florestais	54
2.2.1	Regras Dinâmicas do Autômato Celular	54
2.2.2	Simulações	58
2.2.3	Dados Coletados	64
3	Discussão dos Resultados	66
3.1	Distribuição de densidades e evolução para estados estacionários	66
3.1.1	Modelo original com resistência fixa	67
3.1.2	Modelo sem decaimento do grau de resistência na senescência	68

SUMÁRIO

3.1.3	Modelo com decaimento do grau de resistência na senescência . . .	74
3.2	Histogramas de faixas etárias	82
4	Conclusões	98
	Referências	101

Capítulo 1

Introdução

*“Um povo sem floresta é um povo sem futuro
Um futuro sem floresta é um flagelo do mundo
Um flagelo no mundo é um futuro sem rumo
Um futuro sem rumo é o fim do mundo!”*

[S. Garcia e J. Tello - Floresta, Filosofia em Pé]

A descrição e a compreensão da dinâmica dos ecossistemas é atualmente um dos mais intrigantes temas de pesquisa. A complexidade desses sistemas assim como a não linearidade das equações que descrevem a sua dinâmica são fatores que desafiam a criatividade de vários cientistas[1].

Vários aspectos da Botânica, da Ecologia, da Física, da Matemática, da Química e das Geociências estão presentes na investigação de sistemas naturais fora do equilíbrio tornando indispensável a contribuição interdisciplinar ao estudo de sistemas biológicos e naturais, como os sistemas florestais, mesmo em abordagens mais simples.

1.1 Os Sistemas Florestais

Os organismos vivos em um sistema ecológico, além de interagirem entre si, se relacionam intrinsecamente com seu meio abiótico¹. Um *ecossistema* é qualquer unidade que consista de todos os organismos que funcionam em conjunto, ou seja, uma comunidade biótica², localizados numa área em interação com o sistema físico[1].

¹Componentes não vivos do meio.

²Conjunto de populações que funcionam como uma unidade integradora através de transformações metabólicas co-evoluídas numa dada área de habitat físico.

Para que esse ecossistema funcione e se mantenha, existem portas de entrada e saída de energia tornando-o um sistema aberto³[2, 3]. Segundo Dajoz[4], os ecossistemas obedecem às leis da termodinâmica, as quais determinam a existência de um estado de equilíbrio estacionário e complexo, no qual a composição dos elementos do sistema permanece constante, mesmo com mudanças pontuais dentro do sistema. Esse estado de equilíbrio estacionário apresenta a propriedade de *equifinalidade*, atingindo o mesmo estado final (atrator) partindo de condições iniciais distintas e/ou seguindo diferentes rotas dinâmicas.

A dinâmica não-linear é uma característica fundamental dos ecossistemas florestais e envolve mudanças florísticas e estruturais que ocorrem em uma floresta ao longo do tempo, em diferentes escalas, como é o caso da sucessão ecológica⁴.

O estudo da dinâmica de florestas depende de várias informações fundamentais relacionadas ao objeto de estudo. Todas as espécies vegetais estão sujeitas à sua dinâmica biológica própria, porém acopladas às dinâmicas das demais espécies co-existentes. Desse modo, as florestas não são estáticas mas, em geral, em estados de não-equilíbrio, evoluindo constantemente através de estados que, por sua vez, estão fortemente correlacionados com seus estados anteriores.

Tais mecanismos a que as florestas estão sujeitas faz com que a comunidade mantenha o equilíbrio, a sua estrutura e a sua composição em curtas escalas de tempo, evoluindo lentamente em largas escalas. O estado atual de uma comunidade florestal é dado como resultado da interação dos processos que ocorrem no ambiente, como o crescimento, a mortalidade e a regeneração em larga escala espaço-temporal[2]. Fatores externos ao sistema florestal, tais como pragas, intervenções humanas (manejo) e incêndios tendem a perturbar a dinâmica da floresta, além de fatores inerentes como os topográficos, hidrográficos, climáticos e sazonais.

Existem basicamente dois tipos de ambientes florestais: os naturais e os artificiais. Em ambientes naturais a diversidade de espécies é muito grande, principalmente em florestas tropicais que são bastante heterogêneas por causa das grandes diferenças entre as propriedades das espécies. A formação de clareiras⁵ em florestas tropicais tem grande importância para a heterogeneidade dessas florestas, pois a perda de indivíduos mais ve-

³Sistemas que interagem com o ambiente externo.

⁴Processo de desenvolvimento de uma comunidade ecológica. Ocorre no decurso do tempo e termina quando se estabelece na área uma comunidade estável.

⁵Abertura no dossel da floresta pela queda de árvores ou de parte da copa das mesmas.

lhos faz com que ocorra uma renovação, permitindo o aparecimento de novos indivíduos. Os ambientes artificiais ou reflorestados são, por sua vez, criados para repovoar áreas que por algum motivo tiveram a sua população removida ou por razões industriais.



(a)



(b)

Figura 1.1: (a) Floresta temperada: *Western American Temperate and Inland Rainforests*. (Fonte: <http://www.fragmentedforests.org/photography/western-american-temperate-and-inland-rainforests/>); (b) Floresta tipo savana: Porção de Cerrado Sentido Restrito localizado na Bahia, nas adjacências da Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins, TO (Fonte: <http://www.icmbio.gov.br/pt/biodiversidade-3/fitofisionomias.htm>).

Os tipos de florestas são adaptadas ao clima da região em que se encontram e possuem características próprias, como as florestas tropicais, as de clima temperado e as savanas. As florestas temperadas são encontradas em regiões mais frias, do hemisfério Norte como na América do Norte e norte da Europa. Essas florestas possuem básica-

mente quatro tipos de vegetação: árvores, arbustos, capins e musgos, são menos densas e homogêneas espacialmente, além de possuírem pouca variedade de espécies vegetais. Nessas florestas, a vegetação sofre fortemente a influência das estações do ano, perdendo suas folhas no fim do outono e que nascem novamente com a chegada da primavera (são caducifólias), como ilustrado pela imagem mostrada na figura 1.1(a).

As florestas tropicais são encontradas em regiões de clima quente e úmido, como na América Central e América do Sul, e possuem um bioma bastante rico em diversidade. Já as Savanas são florestas adaptadas a climas mais secos e com presença de queimadas. São encontradas em regiões como África, América do Sul e Austrália, e no Brasil são conhecidas como cerrados, sendo de tipos bastante diferentes em cada uma dessas regiões. Suas vegetações são compostas principalmente de herbáceas e arbustos, como ilustrado pela imagem mostrada na figura 1.1(b).

1.1.1 A Idade das Árvores

A idade ou tempo de vida de um organismo vivo é definida como o período de tempo transcorrido, desde o seu surgimento até o momento presente[5]. Assim, a idade de uma árvore individual é determinada pelo seu tempo de vida enquanto o conceito de idade de uma comunidade florestal é algo mais complexo, precisando ser descrito por uma função de distribuição, uma vez que nem todas as florestas naturais são equiâneas como os plantios de reflorestamento para fins industriais. Florestas nativas, no entanto, possuem uma estrutura de maciços multiâneos[5].

Árvores podem atingir idades em um grande intervalo de valores, o intervalo mais comum é entre 100 e 700 anos, como é o caso de florestas tropicais úmidas na Ásia. Entretanto, há alguns casos raros como algumas variedades de sequóias por exemplo a *Sequoia sempervirens* e a *Sequoiadendron gigantea*, podem atingir até 2000 ou 3000 anos respectivamente. Exemplares de sequóias são apresentados na figura 1.2. Há ainda um exemplar de *Pinus aristata* na Califórnia, por exemplo, com idade estimada entre 4200 e 4600 anos, sendo considerado o ser vivo mais antigo do planeta. No Brasil, alguns pesquisadores consideram um Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*), localizado em Santa Rita do Passa Quatro, Estado de São Paulo, como a árvore mais antiga do país, com cerca de 3000 anos[6].

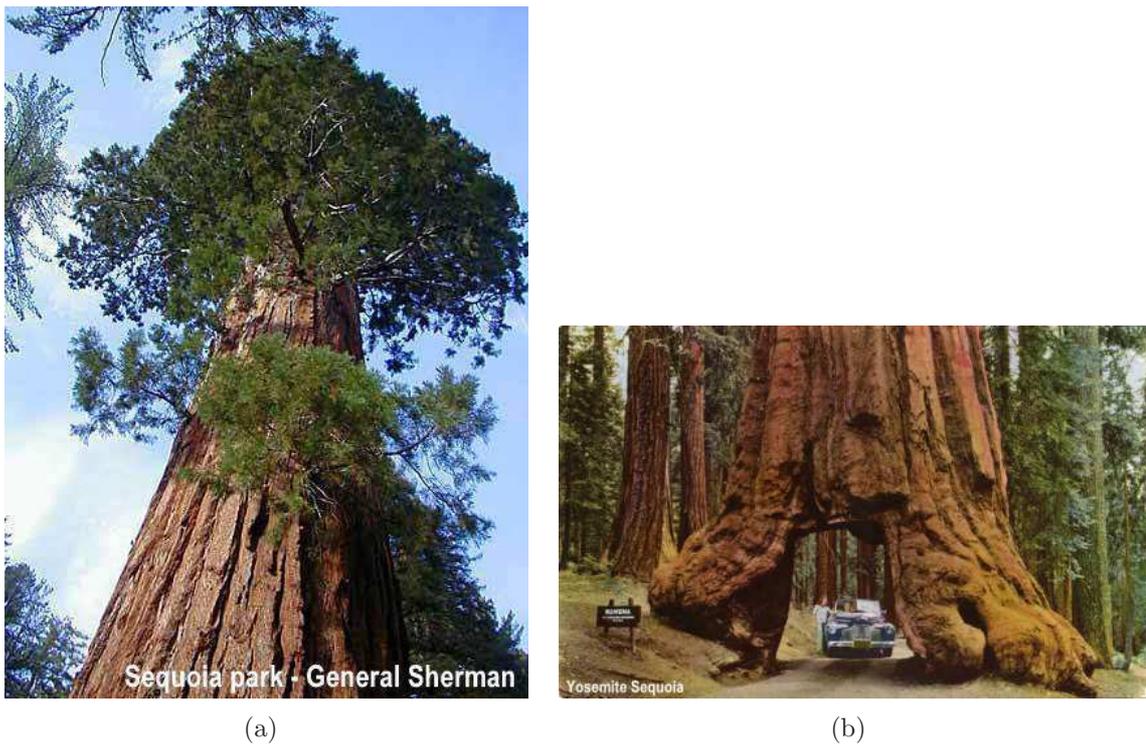


Figura 1.2: Exemplos de sequóias. Em (a) a *General Sherman Tree*, uma *Sequoiadendron gigantea* do *Sequoia National Park* na Califórnia, maior árvore do mundo em volume segundo o Guinness book e possui mais de 2.000 anos de idade. Em (b) uma sequóia que foi modificada para a passagem de veículos, também no *Sequoia National Park*. (Fonte: <http://aidobonsai.com/category/arvores-gigantes-e-exoticas/>)

A idade de uma árvore pode ser estimada por um conjunto de vários parâmetros como o incremento diamétrico à “altura do peito” (aproximadamente 1,30m), área basal, volume e altura de uma espécie em um determinado ambiente florestal[5]. Esses dados são úteis na comparação da capacidade produtiva em diferentes locais.

Estimar a idade de uma árvore não é uma tarefa fácil, vários métodos, com diferentes graus de precisão, são utilizados para tal fim. Um deles, pouco preciso, normalmente é utilizado na classificação de árvores por faixas etárias na silvicultura, é o método da observação, o qual exige, além de experiência e prática, um profundo conhecimento do ritmo de desenvolvimento de cada espécie e da forma como as árvores estão dispostas na floresta.

Algumas espécies podem formar nós onde ocorre a ramificação do tronco, essas estruturas são chamadas de verticilos, ocorrendo no final de cada época de reprodução vegetativa. Assim, o número de verticilos pode estar associado à idade da árvore de uma forma mais precisa. Contudo, é comum os verticilos mais inferiores caírem com o passar

do tempo, dificultando a contagem. Esse método é pouco utilizado em florestas tropicais e sub-tropicais.

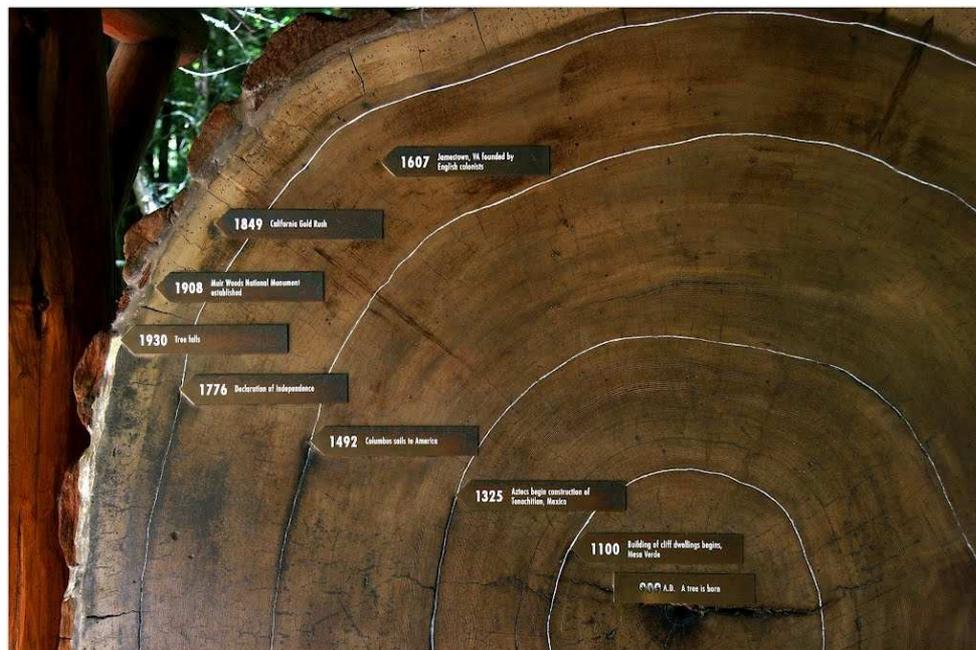


Figura 1.3: Secção de um tronco mostrando os anéis de crescimento de acordo com as épocas em que foram criados. (Fonte: <http://www.panoramio.com/photo/78709516>, por Ross Campbell.)

Outro método bastante utilizado em regiões com estações climáticas bem definidas é o da contagem dos anéis de crescimento em uma seção transversal do tronco, que pode ser feita com a árvore em pé ou abatida. A figura 1.3 apresenta uma seção transversal do tronco de uma “sequóia costeira” (*Redwood*) onde se observa a presença de anéis de crescimento de acordo com a época em que foram criados, estimados entre 900-1930 DC.

Os anéis de crescimento são formados pela deposição de camadas de tecido lenhoso no caule, cada uma possuindo duas regiões bem definidas, uma mais clara denominada lenho inicial e outra mais escura, denominada lenho tardio. Essas camadas são devido às mudanças de atividade das espécies ao longo do ano, havendo um período vegetativo e outro inadequado ao desenvolvimento da árvore. Dessa forma, em regiões de clima temperado, os anéis de crescimento são, em geral, bem definidos, embora pequenos períodos de seca e chuva, doenças ou até ataques de insetos[7] podem provocar o aparecimento de anéis extras. A figura 1.4 mostra os anéis de crescimento.



Figura 1.4: Secção de tronco mostrando anéis de crescimento. Mais próximos à casca, os anéis se tornam cada vez mais finos. (Fonte: <http://m.inmagine.com/image-ptg01406975-Tree-trunk-cross-section:-tree-rings.html>)

As árvores passam por três diferentes períodos de crescimento de seu tronco[8]. O primeiro período é conhecido como “período formativo”, onde o ritmo de crescimento diamétrico do tronco e da copa é maior, aumentando a área de ocupação da árvore tornando-a mais robusta. Posteriormente, a árvore passa pelo “período maduro”, ou de meia-idade, alcançado após 40-100 anos e onde ocorre uma diminuição no ritmo de crescimento do tronco, e a copa e a altura da árvore se estabilizam. Nesse período os anéis se tornam mais finos, mantendo quase a mesma seção transversal do tronco. O terceiro e último período, chamado “senescência”, é o período em que a copa da árvore começa a diminuir, devido a quebra de galhos e da folhagem. Nesse período a espessura dos anéis se torna ainda menores.

A figura 1.5, retirada da referência [8], mostra um diagrama da seção transversal do tronco de uma árvore genérica apresentando os anéis de crescimento em seus diferentes períodos de formação. Assim, a árvore tem um período de crescimento onde a robustez de seu tronco é maior (período formativo), uma segunda em que a robustez se estabiliza (período maduro) e uma última onde a robustez da árvore diminui (senescência). A figura 1.6 ilustra um esquema aproximado de como a robustez da árvore evolui de acordo com a idade. A figura 1.4 ilustra a formação dos anéis considerando a robustez da árvore.

Um histograma típico da frequência de árvores por idade na fase de senescência é

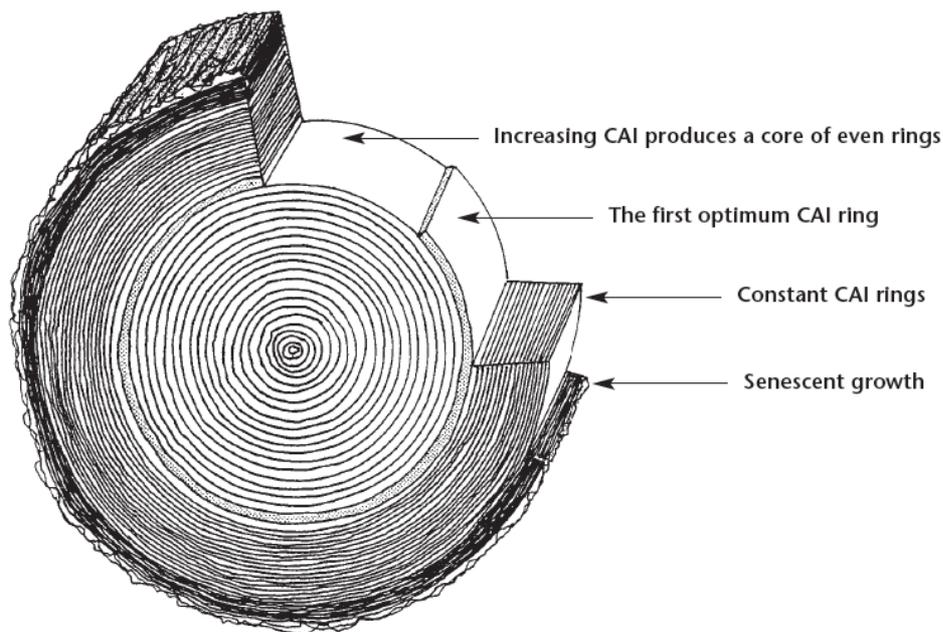


Figura 1.5: Esquema do tronco de uma árvore, mostrando os anéis nos diferentes períodos de crescimento. (CAI = current annual increment, ou “incremento anual atual”)[8].

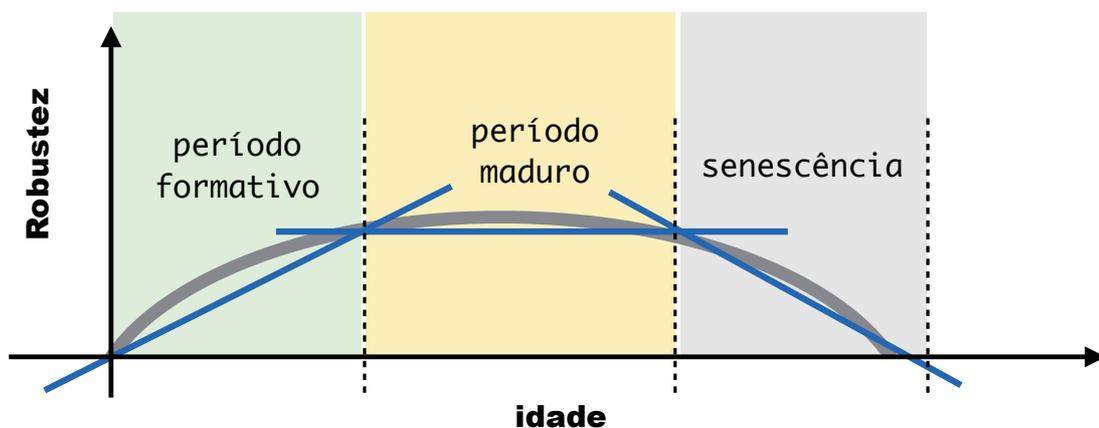


Figura 1.6: Diagrama da robustez por idade para uma árvore genérica.

apresentado na figura 1.7, extraída da referência [9], mostrando o decaimento na quantidade de árvores nessa fase com o aumento da idade. O histograma apresenta uma faixa etária para idades maiores que 100 anos, e geralmente esse tipo de histograma é mais comum de se encontrar na literatura, tendo em vista que o interesse comercial para o manejo florestal está voltado para árvores mais maduras.

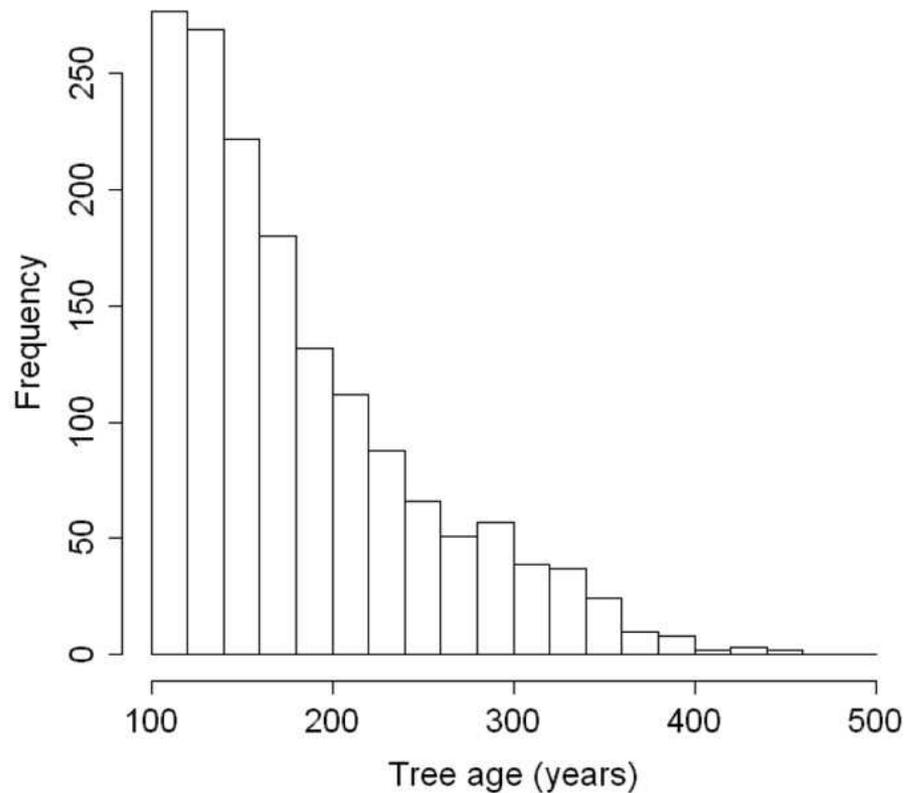


Figura 1.7: Distribuição de idades das árvores de uma floresta de carvalhos (*oak trees*)[9].

1.2 Os Incêndios Florestais

Um incêndio florestal ocasional é a propagação descontrolada de fogo em uma região florestal que difere de uma simples queimada pela amplitude dos estragos causados, sendo bem mais devastante, os incêndios florestais são causadores de grandes desastres naturais e destroem milhões de acres de florestas por ano apenas nos Estados Unidos[10]. Causam grandes impactos econômicos, sociais e ambientais pondo em perigo não apenas o ecossistema florestal, mas também os habitantes que moram ao redor de áreas florestais incendiadas, inclusive meses após o fim do incêndio. Um incêndio pode ser causado por vários fatores, no Brasil, por exemplo, a principal causa de incêndios florestais é criminosa[11], sendo provocada por pessoas inescrupulosas. Há, no entanto, incêndios provocados com o objetivo de limpeza de áreas para utilização, o caso das queimadas; queimadas controladas, como método de prevenção de grandes incêndios, e causas acidentais diversas, como queda de raios.

Os incêndios podem causar diversos danos às florestas, dependendo das condições existentes no ambiente, como tipo de floresta, combustível, clima, etc. Os danos causa-

dos às árvores são os mais visíveis e que chamam mais atenção após a ocorrência de um incêndio, mas podem ocorrer danos ao solo e à fauna, além de danos ao planejamento florestal interferindo na qualidade e quantidade da produção madeireira de florestas. Outros tipos de danos que podem ocorrer são quanto ao aspecto recreativo e paisagístico de parques nacionais e quanto à propriedade, destruindo casas e até causando danos à vida humana[11, 12].

Os danos causados às árvores variam dependendo da intensidade e duração do fogo, da espécie vegetal atingida e de suas idades. As árvores mais jovens ou muito velhas são mais susceptíveis ao fogo que as adultas maduras e as árvores mais folhosas são mais sensíveis que as pouco folhosas, como as coníferas. A árvore morre devido ao aquecimento do câmbio acima de certa temperatura apropriada. Assim, os exemplares mais maduros são mais resistentes ao fogo por possuírem a casca do tronco mais espessa que dá uma maior proteção ao câmbio. Já a cobertura folhosa das árvores contribui para o aumento da temperatura durante a propagação do fogo.

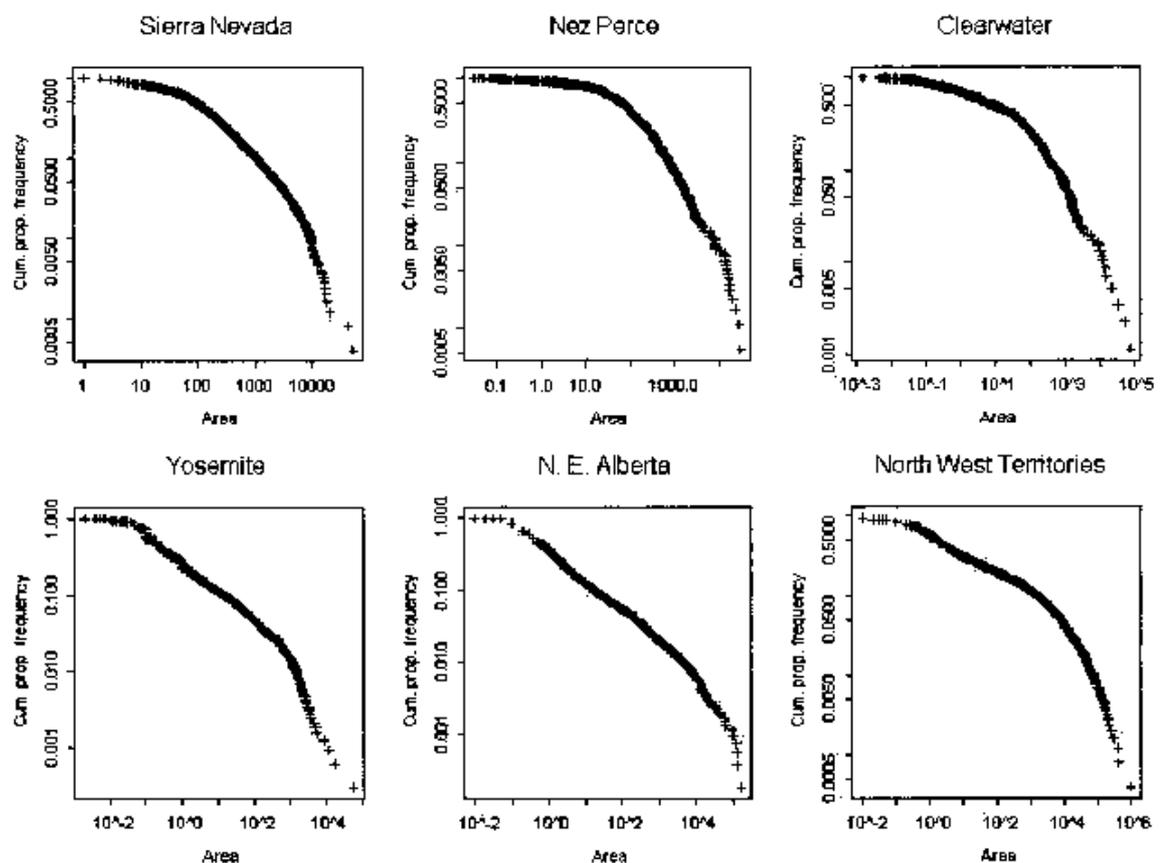


Figura 1.8: Distribuições acumuladas de áreas queimadas em seis diferentes regiões florestais[13].

Para ilustrar dados reais de incêndios florestais reais, apresentamos a figura 1.8 que apresenta alguns gráficos de distribuições acumuladas de áreas queimadas em seis diferentes regiões florestais. Esses dados foram apresentados por Reed e McKelvey[13].

Vários estudos foram realizados sobre a estrutura etária de florestas e o papel dos incêndios florestais ocorridos nessas áreas. Por causarem danos à vegetação local, os incêndios florestais afetam diretamente a estrutura etária das árvores da floresta. Portanto, distribuição etária depende dos ciclos de incêndios que ocorrem no ambiente florestal[14]. Descrever essa dependência é o objetivo central dessa dissertação.

1.2.1 Metodologias de estudo de Incêndios Florestais

Os incêndios florestais vem sendo largamente estudados por ensaios de campo, modelos matemáticos e simulações computacionais[15]. Com a existência de um grande número de modelos variados para incêndios florestais e sendo o esse estudo bem amplo e de grande interesse, os modelos foram agrupados de acordo com algumas características em algumas categorias. Vários pesquisadores realizaram tentativas de organização desses modelos[16], e Sullivan[17, 18, 19] dividiu os modelos de incêndios florestais em três categorias, apresentando modelos criados/utilizados no período de 1990 a 2007. As categorias criadas por Sullivan são:

1. **Modelos Físicos e quase físicos:** Modelos físicos tentam representar as características físicas e químicas da propagação de incêndios enquanto os modelos quase-físicos tentam representar apenas a natureza física do fenômeno;
2. **Modelos empíricos e semi-empíricos:** Modelos puramente empíricos não possuem nenhuma compreensão física, sendo apenas estatístico e os modelo semi-empíricos usa alguma forma física em sua modelagem estatística;
3. **Modelos de simulação e modelos matemáticos:** Modelos de simulação implementam modelos pré-existentes e os matemáticos utilizam preceitos matemáticos para a propagação de incêndios.

Em particular, modelos matemáticos baseados em equações diferenciais, bem como modelos utilizando a técnica de autômatos celulares têm sido propostos com várias finalidades. Há na literatura vários modelos de simulação para incêndios florestais mais

atuais que vêm sendo estudados para investigação das dinâmicas florestais e seus diversos parâmetros, como a evolução da produção de biomassa, da produção de matéria lenhosa e do risco de incêndio, onde a variação pode ocorrer de forma natural ou pela ação do homem[20]. Como referências mais atuais temos os modelos de Berger e Hildenbrandt[21], Monserud[22] e Weisberg et al[23].

Por exemplo, no modelo para estudo de incêndios florestais proposto por Bak, Chen e Tang (modelo BCT)[24] em 1990, as árvores nascem a uma taxa p e há a ocorrência de incêndios pela floresta a partir de regras determinísticas. O modelo foi formulado a fim de aprofundar os estudos sobre a criticalidade auto-organizada, tema que já havia sido estudado anteriormente na tentativa de explicar alguns fenômenos conhecidos. O modelo BCT, no entanto, não apresenta criticalidade auto-organizada[25, 26].

A criticalidade auto-organizada (SOC, do inglês *Self-Organized Criticality*) é um fenômeno que ocorre em sistemas dinâmicos os quais atingem um estado estacionário estável e crítico, sem que sejam necessários ajustes nas condições iniciais ou intervenções externas, alcançando a criticalidade naturalmente. Florestas são um bom exemplo de estudo da criticalidade auto-organizada, uma faísca pode devastar uma floresta, apenas uma parte da rede de árvores ou até não causar diferenças significativas à floresta, ou seja, uma pequena perturbação externa pode causar uma resposta em várias ordens de tamanho, característica de um sistema na criticalidade. Nesse contexto, o estudo de sistemas dinâmicos como os incêndios florestais usando autômatos celulares[27] é uma forma mais simples de estudar o fenômeno da criticalidade auto-organizada. A criticalidade auto-organizada aparece em diversos sistemas físicos e vários experimentos tem sido realizados nessa área, em problemas como o da pilha de areia, avalanches, supercondutividade, terremotos e em modelos para incêndios florestais[28].

Posteriormente, com esse mesmo objetivo, Drossel e Schwabl (DS)[29] propuseram um modelo para incêndios florestais baseado no modelo BCT[24]. O modelo DS introduz uma nova regra de retroalimentação dos incêndios através de uma taxa de “queda de raios” f . Esse modelo apresenta aparentemente um comportamento do tipo lei de potência para distribuições de tamanho e duração de incêndios no limite $f/p \rightarrow 0$. Grassberger[30], sem discordar com o comportamento crítico, propõe que o comportamento de lei de potência deveria ser corrigido. Atualizações do modelo DS para incêndios florestais foram implementados por Drossel e Schwabl, como o modelo que considera algumas árvores

imunes[31]. Atualmente o comportamento crítico para o modelo Drossel-Schwabl continua em aberto[32, 33].

Posteriormente o modelo de Drossel-Schwabl foi generalizado para considerar a heterogeneidade no ambiente florestal[34], onde a floresta possui árvores com diferentes graus de resistências à ignição.

Nesta dissertação, estudos recentes correlacionados a idade das árvores em uma floresta com sua resistência a incêndios serão considerados, sendo introduzido ao modelo proposto em [34] árvores com resistência variável com respeito à idade. Esperamos entender como a distribuição etária de árvores em uma floresta é afetada pela ocorrência de incêndios.

1.3 Organização da dissertação

No primeiro capítulo desta dissertação conceitos básicos de dinâmica de florestas e incêndios florestais são apresentados e discutidas algumas propriedades das florestas com relação à idade das árvores e sua distribuição etária. Foram comentados alguns modelos para incêndios florestais propostos com a finalidade de investigar os fenômenos de criticalidade auto-organizada.

No segundo capítulo, são apresentados conceitos de autômatos celulares, ferramenta matemática utilizada nas simulações realizadas nesta dissertação, além da descrição do modelo proposto e desenvolvido para incêndios florestais.

No terceiro capítulo são apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas e baseadas no modelo descrito no segundo capítulo. O quarto capítulo traz as conclusões desta dissertação.

Capítulo 2

Modelos de Autômatos Celulares para Incêndios Florestais

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”*

[Albert Einstein]

Sistemas complexos podem ser estudados através de várias ferramentas matemáticas, dentre elas, encontram-se os modelos de Autômatos Celulares, utilizados como alternativa para modelagem computacional desses sistemas[35].

Os Autômatos Celulares são bastante utilizados como uma ferramenta matemática para investigar a determinação e/ou a formação de padrões com o objetivo de explicar fenômenos da natureza, bem como comportamentos sociais, ambientais e biológicos, assim como para determinar os fatores que influenciam em suas regras de inter-relação/interação. Vários sistemas físicos, sociais e biológicos servem de estímulo para a realização de simulações utilizando os modelos de autômatos celulares[36].

Neste capítulo é apresentado um breve histórico do estudo de autômatos celulares, descrevendo alguns modelos e suas características. Também é apresentado o modelo baseado em autômatos celulares para o desenvolvimento dos estudos realizados nesta dissertação.

2.1 Autômatos Celulares

No final da década de 40, surgiram novas técnicas computacionais que podiam ser usadas na modelagem de sistemas complexos[37]. Por expressar, em sua evolução dinâmica, os comportamentos característicos de sistemas naturais, os autômatos celulares (CA, do inglês *Cellular Automata*) foram usados para investigar vários sistemas biológicos, físicos e sociais. Essa nova ferramenta matemática acabou por difundir-se devido à sua capacidade de gerar simulações, previsões e resultados não alcançados, anteriormente, pelos métodos matemáticos que envolvem sistemas de equações diferenciais (ordinárias e parciais).

Suas principais características são: computação paralela numa estrutura espaço-temporal discreta, com evolução temporal definida por regras locais, simples e iguais para todas as células. Cada célula pode estar em um dos possíveis estados de um conjunto finito e discreto. O estado de uma célula em um instante $t + 1$, depende apenas do seu estado e dos estados dos seus vizinhos no instante t , em uma vizinhança pré-estabelecida. Embora as regras sejam as mesmas para todos os componentes do sistema, o estado dos componentes vizinhos pode variar indefinida e complexamente ao longo do tempo, podendo originar novos padrões e chegando inclusive até à sua auto-reprodução[38].

2.1.1 Breve Histórico

No final da década de 40, o húngaro John von Neumann e o polonês Stanislaw Ulam se colocaram entre os maiores contribuidores para o desenvolvimento das tecnologias computacionais da época e, do ponto de vista teórico, introduziram o conceito de autômatos celulares. von Neumann trabalhava no desenvolvimento de um sistema que fosse capaz de se autoreplicar. Ele estava interessado em encontrar um tipo de organização lógica suficiente para um autômato controlar a si próprio de tal maneira que pudesse também se reproduzir. A sua primeira solução foi a utilização de um sistema autômato cinemático, porém o modelo era limitado[38].

Paralelamente, Ulam trabalhava no Laboratório Nacional de Los Alamos (Los Alamos, Novo México, EUA) estudando o crescimento de cristais, usando a mais simples rede (matriz) como seu modelo. Ulam sugeriu a von Neumann que desenvolvesse o seu modelo através de uma abstração matemática da mesma forma como ele havia utilizado para es-

tudar o crescimento dos cristais. Assim, von Neumann concebeu um modelo matemático abstrato para o seu problema e, como resultado, obteve-se o primeiro “Autômato Celular” nomeado UCC (Universal Copier and Constructor). Posteriormente, foi mostrado que um autômato celular pode ser universal[39], isto é, ser computacionalmente completo. Vale ressaltar porém, que as regras desenvolvidas no UCC não puderam ser implementadas em um computador por serem muito complexas à época[37, 38].

Para von Neumann, a palavra autômato era destinada às máquinas automáticas cujo comportamento poderia ser definido por termos matemáticos inconfundíveis. As conexões entre a biologia e a teoria dos autômatos eram os principais interesses de von Neumann. Em seus estudos predominava a ideia do fenômeno biológico da autoreprodução. Um dos principais objetivos de von Neumann era o de aplicar essas sequências em seus estudos sobre neurofisiologia[37].

Os autômatos celulares passaram a receber maior atenção em 1970 quando o matemático John Holton Conway propôs um modelo de autômatos celulares que buscava simular a evolução de populações de seres vivos baseada em um conjunto de regras locais simples. Esse modelo ficou conhecido como *Game of Life* (ou *Jogo da Vida*)[40].

Em 1982, Stephen Wolfram[41] apresentou um esboço da análise da mecânica estatística dos autômatos celulares e descreveu algumas características genéricas de seu comportamento, chegando à conclusão de que esses autômatos podem ser usados como modelos matemáticos de sistemas físicos, biológicos e computacionais[38]. Em 1983, esse autor publicou um artigo[42] no qual apresentou uma investigação de autômatos celulares como modelos matemáticos para sistemas estatísticos auto-organizados. Ele concluiu que, apesar da simplicidade da sua construção, esses sistemas são capazes de exibir comportamentos complexos. Wolfram desenvolveu estudos sobre autômatos ao longo dos anos e em 2002 publicou os resultados das suas pesquisas em um livro intitulado “*A New Kind of Science*” [43].

Sem minimizar o valor das contribuições de von Neumann e Conway, foi a partir dos trabalhos de Wolfram, sobretudo aqueles realizados ainda na década de 1980, que este tipo de modelo de evolução temporal adquiriu o status que hoje tem na compreensão dos sistemas complexos. Podemos dizer que foram as pesquisas iniciais de Wolfram que revelaram como um sistema determinista extremamente simples podia apresentar um comportamento extraordinariamente complexo: os Autômatos Celulares mais simples que

são capazes de exibir uma dinâmica complexa foram, a partir de então, designados por Autômatos Celulares Elementares[44].

2.1.2 Definições

Os autômatos celulares são considerados idealizações matemáticas simples de sistemas naturais[40]. Informalmente, temos uma definição mais didática, e formalmente uma definição matemática mais rigorosa. Seguem as definições nessas duas abordagens.

Definição matemática rigorosa:

Considerar:

- \mathcal{L} uma rede regular (os elementos de \mathcal{L} são chamados de células);
- \mathcal{S} um conjunto finito de estados associados a cada célula;
- \mathcal{N} um conjunto finito, (de tamanho $|\mathcal{N}| = n$) de *vizinhança*, tal que $\forall r \in \mathcal{N}$, $\forall c \in \mathcal{L} : r + c \in \mathcal{L}$.
- $f : \mathcal{S}^n \rightarrow \mathcal{S}$ uma função de transição¹.

Assim, a quádrupla $(\mathcal{L}, \mathcal{S}, \mathcal{N}, f)$ é dita um *autômato celular*.

Em uma abordagem informal, um autômato celular pode ser caracterizado simplesmente por suas propriedades fundamentais[38, 42]. São elas:

- Estar definido em uma matriz, ou rede, regular e uniforme, cujos sítios idênticos e discretos são chamados de células;
- A evolução se dá em passos discretos de tempo de acordo com regras determinísticas;
- Cada célula é definida por um estado caracterizado por um conjunto finito de parâmetros;
- O estado de cada célula evolui de acordo com o mesmo conjunto de regras, as quais relacionam o estado da célula em cada instante com seu estado no instante anterior

¹Em computação, uma função de transição corresponde àquela que define as transições de estado de uma máquina de Turing ou uma máquina de estados.

e com os estados de um número finito de células vizinhas, previamente definidas, e denominadas de vizinhança;

- A relação entre o estado de uma célula com aqueles da sua vizinhança é local e uniforme.

2.1.3 Geometria

Subentende-se como geometria em um modelo de autômatos celulares o conjunto formado pela dimensão espacial da rede, a forma de cada célula (ou autômato) e a forma como elas estão distribuídas na rede. Para o sistema de autômatos celulares é necessário haver uma geometria regular, onde todas as células possuem o mesmo tamanho e estão dispostas em uma rede (ou grade) da mesma maneira[40]. Assim, para definir a geometria de um dado sistema de autômatos celulares deve-se ter bem definidos sua dimensão e o formato de suas células.

Dimensão da Rede

Um sistema de autômatos celulares pode ser representado matematicamente na forma de um vetor ou matriz de comprimento finito ou infinito, onde cada entrada representa uma célula associada a cada posição nesse vetor ou nessa matriz[37]. Cada componente do vetor ou matriz guarda apenas um estado. Dessa forma, os autômatos celulares podem ser construídos em uma dimensão ($1D$, um vetor) ou em mais dimensões (nD , uma matriz), sendo n um número inteiro e positivo. A figura 2.1 mostra uma representação das nD dimensões de um autômato celular, para $n = 1, 2, 3$. Para o caso tridimensional, figura 2.1(c), as cores são apenas ilustrativas para melhor visualização.

Formato da Rede

O formato da célula pode assumir geometrias regulares como uma célula quadrada, triangular ou hexagonal no caso 2D, como mostrado na Figura 2.2, ou algum outro tipo de geometria regular no caso de uma dimensão maior que 2. Os componentes da rede de contato devem ter todos a mesma forma, ou seja, a rede deve ser de geometria uniforme.

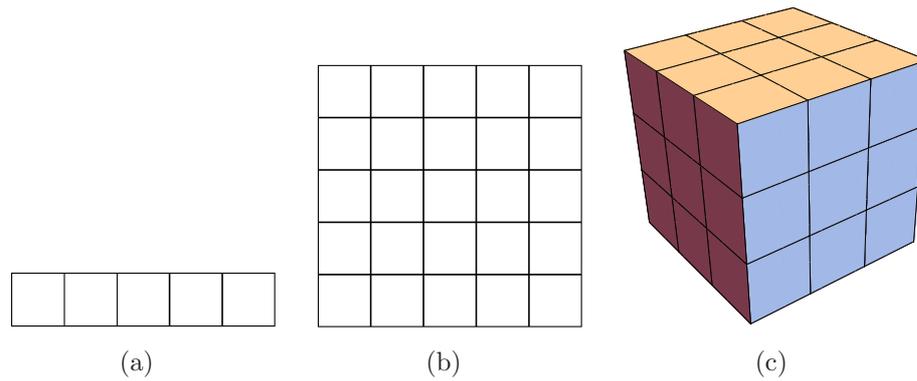


Figura 2.1: Dimensões da rede de um autômato celular. Estão representados os casos: (a) Unidimensional ($n = 1$); (b) Bidimensional ($n = 2$); (c) Tridimensional ($n = 3$).

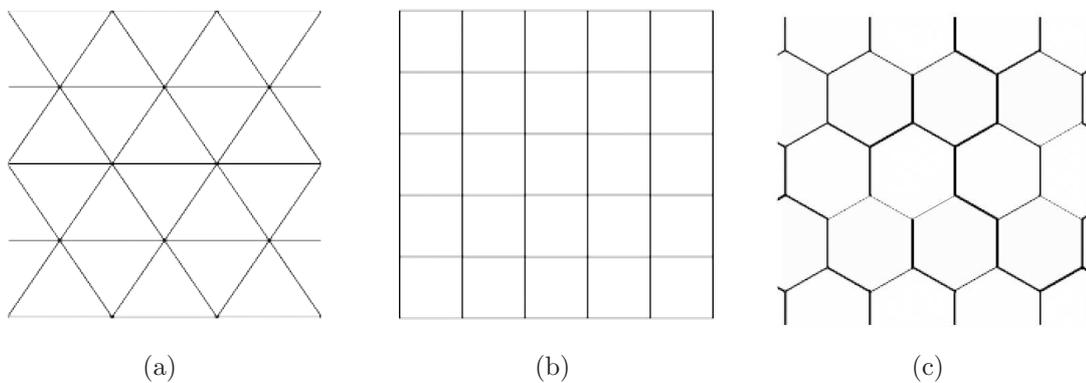


Figura 2.2: Representação dos possíveis formatos de um autômato celular 2D. (a) A rede triangular ou hexagonal; (b) Quadrangular; (c) Rede Favo de mel.

2.1.4 Vizinhança

Quando um autômato celular é construído, consideram-se a(s) células iniciais distribuídas em uma matriz ou rede. As células são regiões delimitadas espacialmente e a vizinhança é eleita de acordo com a proximidade à célula central[45]. A vizinhança pode ser uni, bi ou tridimensional e serão exemplificadas nesta dissertação vizinhanças para sistemas uni e bidimensional.

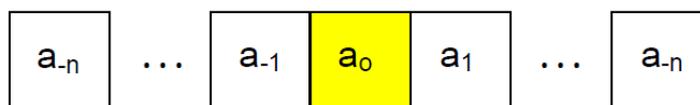


Figura 2.3: Vizinhança de um autômato celular unidimensional onde a célula central a_0 é a célula inicial, e a vizinhança está definida pelas primeiras n células à direita e à esquerda, respectivamente.

Na figura 2.3 observa-se a vizinhança de um autômato unidimensional, com uma célula central a_0 e n vizinhas, imediatamente à esquerda a_{-j} e à direita a_j ($j = 1 \dots n$).

Para um autômato bidimensional os principais tipos de vizinhança são exemplificados na figura 2.4. As mais utilizadas nos sistemas de autômatos celulares bidimensionais são as vizinhanças de von Neumann (Figura 2.4(a)) e de Moore (Figura 2.4(b)). Nas figuras 2.4, 2.5 e 2.6 as células em amarelo são as células centrais e as azuis suas vizinhas.

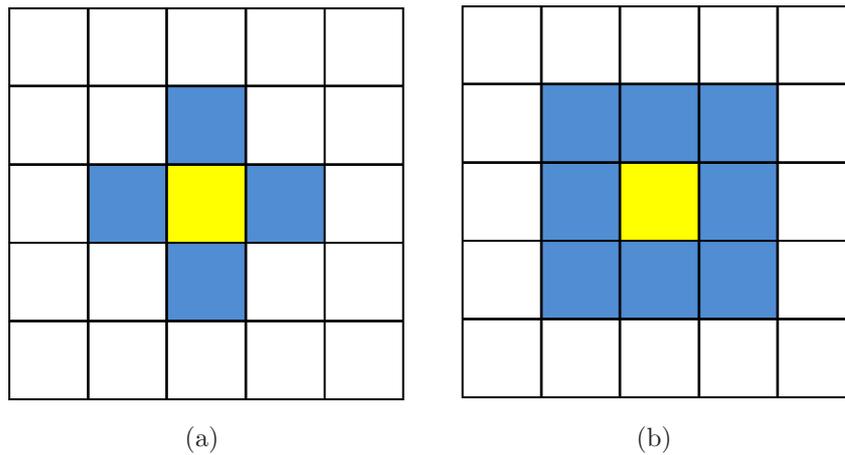


Figura 2.4: Exemplos de vizinhanças mais utilizadas na rede quadrada. (a) von Neumann e (b) Moore. As células em amarelo são as células centrais (iniciais) e as em azul, suas vizinhas.

Algumas variações dessas vizinhanças bidimensionais também são implementadas. Nas figuras 2.5(a) e 2.5(b) estão representadas, respectivamente, as vizinhanças de von Neumann original, apenas com os primeiros vizinhos, e de von Neumann estendida incluindo também os segundos vizinhos (em azul mais claro). Da mesma maneira estão representadas as vizinhanças de Moore com os primeiros vizinhos em 2.5(c) e incluindo os segundos vizinhos em 2.5(d). As vizinhanças de von Neumann e de Moore originais podem ser consideradas com raio de vizinhança $\mathcal{R} = 1$. As variações apresentadas possuem “raio” $\mathcal{R} = 2$ e outras variações desses raios podem ser também implementadas. A vizinhança aplicada pode ser ainda aleatória como exemplificado na figura 2.6.

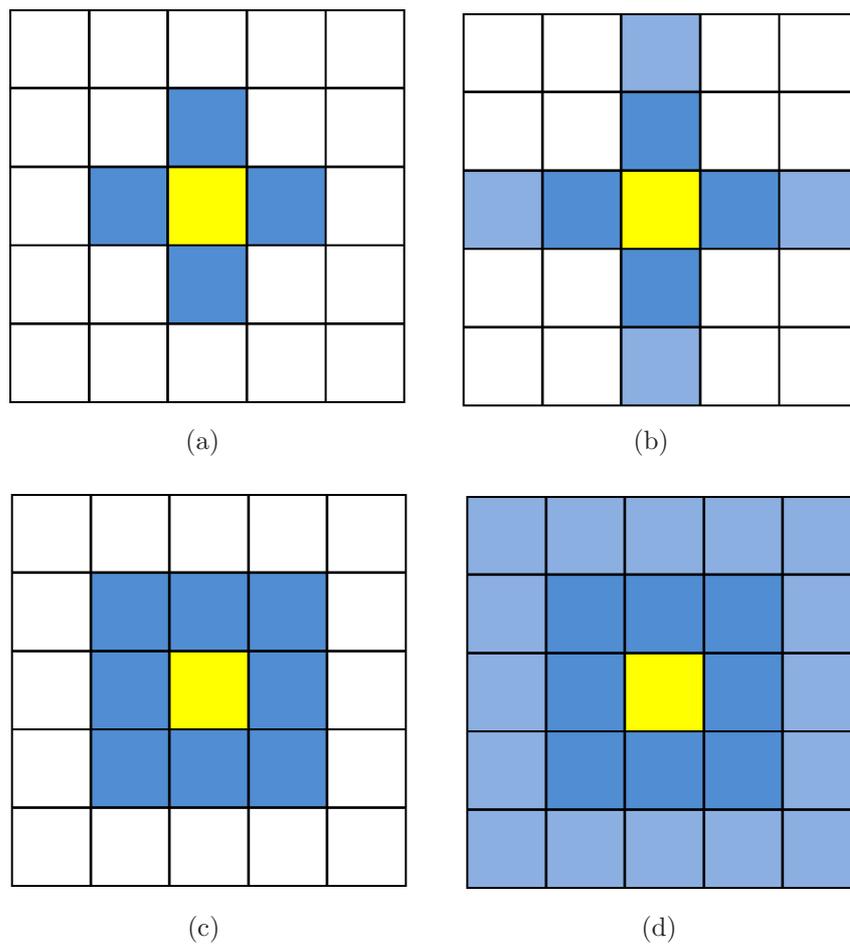


Figura 2.5: Vizinhanças originais e suas extensões (vizinhanças ampliadas). (a) Vizinhança de Neumann com $\mathcal{R} = 1$ (original); (b) Vizinhança de Neumann estendida com $\mathcal{R} = 2$; (c) Vizinhança de Moore com $\mathcal{R} = 1$ (original); (d) Vizinhança de Moore estendida com $\mathcal{R} = 2$;

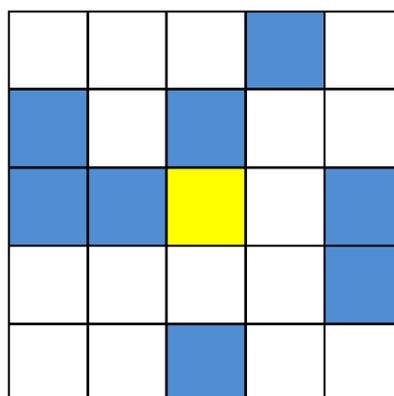


Figura 2.6: Exemplo de uma vizinhança aleatória.

2.1.5 Regras de Transição

A evolução de um autômato celular é discreta, isto é, ocorre em passos de tempo unitários, segundo regras de transição locais. Dessa maneira é necessário definir essas regras de transição local que determinam os estados de cada uma das células no instante de tempo seguinte.

As regras de transição dependem do estado da própria célula e dos estados das células da vizinhança. Tais regras podem ser determinísticas ou não determinísticas, isto é, probabilísticas. Para regras determinísticas o estado de uma célula no passo de tempo seguinte é completamente determinado conhecendo-se apenas seu estado e os estados das suas células vizinhas. Para as regras probabilísticas esse estado é determinado a partir de uma função de probabilidades, as quais podem envolver os estados da célula e de sua vizinhança.[40].

Algumas condições são impostas para as regras de transição local:

- O estado de uma célula num instante t deve depender apenas dos estados das células no instante imediatamente anterior para o caso das regras determinísticas, e no caso de regras probabilísticas, pode depender também de uma função de probabilidades;
- Todas as células do sistema partilham das mesmas regras de transição;
- A aplicação da regra de evolução temporal é efetuada em instantes de tempo discretos, isto é, por passos $t = 0, 1, 2, 3, \dots$ e de forma síncrona para todas as células (atualização paralela).

Embora não seja necessário, a regra local de um autômato celular é usualmente determinística. Um sistema de autômatos onde cada célula tem sua própria regra local é chamado de híbrido. Existem ainda generalizações de sistemas de autômatos celulares nos quais cada célula pode ter sua regra local mudada ao longo do tempo[46].

2.1.6 Condições de Contorno

Geralmente há necessidade de considerar que o sistema de autômatos celulares seja infinito em todas as direções do seu espaço. Nesses casos, a implementação computacional impõe restrições por limitação de memória. Assim, deve-se adotar condições de fronteiras ou contorno nas bordas do autômato para que possamos reduzir o seu efeito.

Essas condições de contorno indicam como as células das bordas do autômato se comportam em relação às suas vizinhas, já que as bordas da rede não possuem vizinhas definidas pela rede original. Assim, são definidas células vizinhas às do contorno, necessárias para completar o conjunto de vizinhos das células que haveria se a rede fosse infinita.

Há vários tipos de condições de contorno possíveis. Discutiremos os 3 casos mais usados: as condições de contorno (a) periódicas; (b) reflexiva e (c) fixa.

- (a) **Condições de contorno periódicas:** obtidas estendendo-se o autômato, isto é, a última célula em uma dada direção de simetria terá como seu vizinho a primeira célula naquela direção especificada, e vice-versa.
- (b) **Condições de contorno reflexivas:** obtidas refletindo-se o autômato em cada borda.
- (c) **Condições de contorno fixas:** obtidas simplesmente fixando os estados das células na borda do autômato, e estes estados serão os mesmos em qualquer instante da simulação.

Pode-se observar nas figuras 2.7, 2.8 e 2.9 os casos periódico, reflexivo e fixo, respectivamente, em um autômato bidimensional. As células em amarelo fazem parte da rede e as fronteiras estão representadas em branco.

O limite periódico é representado quando as células da última linha fazem parte da vizinhança das células da primeira linha (e vice-versa) e as células da última coluna fazem parte da vizinhança das células da primeira coluna (vice-versa). Considerando-se a vizinhança de von Neumann na figura 2.7 a célula a_{11} terá como vizinhos à esquerda a célula a_{18} e como superior a célula a_{81} , assim como as células a_{21} e a_{12} . No caso da vizinhança de Moore também são vizinhas as células a_{28} , a_{82} e a_{88} além da célula a_{22} .

O limite reflexivo é representado quando cada célula da borda é refletida para ser utilizada como parte do limite do autômato. Por exemplo, na figura 2.8 a célula a_{31} tem como vizinho à esquerda a própria célula a_{31} .

O limite fixo é obtido simplesmente escolhendo como serão os estados das células no contorno da matriz, e esses estados serão mantidos durante todo o tempo. Como exemplo, a Figura 2.9 em que as células das bordas terão como vizinhas as células brancas externas da matriz. Essas células brancas, com estado definido e fixo, serão mantidas durante toda a evolução do autômato.

Existem alguns outros tipos de condições de contorno, geralmente associadas a uma das três acima comentadas, sendo variações dessas, como é o caso das condições de contorno helicoidais por exemplo.

a₈₈	a₈₁	a₈₂	a₈₃	a₈₄	a₈₅	a₈₆	a₈₇	a₈₈	a₈₁
a₁₈	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈	a₁₁
a₂₈	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃	a ₂₄	a ₂₅	a ₂₆	a ₂₇	a ₂₈	a₂₁
a₃₈	a ₃₁	a ₃₂	a ₃₃	a ₃₄	a ₃₅	a ₃₆	a ₃₇	a ₃₈	a₃₁
a₄₈	a ₄₁	a ₄₂	a ₄₃	a ₄₄	a ₄₅	a ₄₆	a ₄₇	a ₄₈	a₄₁
a₅₈	a ₅₁	a ₅₂	a ₅₃	a ₅₄	a ₅₅	a ₅₆	a ₅₇	a ₅₈	a₅₁
a₆₈	a ₆₁	a ₆₂	a ₆₃	a ₆₄	a ₆₅	a ₆₆	a ₆₇	a ₆₈	a₆₁
a₇₈	a ₇₁	a ₇₂	a ₇₃	a ₇₄	a ₇₅	a ₇₆	a ₇₇	a ₇₈	a₇₁
a₈₈	a₈₁	a₈₂	a₈₃	a₈₄	a₈₅	a₈₆	a₈₇	a₈₈	a₈₁
a₁₈	a₁₁	a₁₂	a₁₃	a₁₄	a₁₅	a₁₆	a₁₇	a₁₈	a₁₁

Figura 2.7: Condições de contorno periódicas para um autômato celular bidimensional.

a₁₁	a₁₁	a₁₂	a₁₃	a₁₄	a₁₅	a₁₆	a₁₇	a₁₈	a₁₈
a₁₁	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈	a₁₈
a₂₁	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃	a ₂₄	a ₂₅	a ₂₆	a ₂₇	a ₂₈	a₂₈
a₃₁	a ₃₁	a ₃₂	a ₃₃	a ₃₄	a ₃₅	a ₃₆	a ₃₇	a ₃₈	a₃₈
a₄₁	a ₄₁	a ₄₂	a ₄₃	a ₄₄	a ₄₅	a ₄₆	a ₄₇	a ₄₈	a₄₈
a₅₁	a ₅₁	a ₅₂	a ₅₃	a ₅₄	a ₅₅	a ₅₆	a ₅₇	a ₅₈	a₅₈
a₆₁	a ₆₁	a ₆₂	a ₆₃	a ₆₄	a ₆₅	a ₆₆	a ₆₇	a ₆₈	a₆₈
a₇₁	a ₇₁	a ₇₂	a ₇₃	a ₇₄	a ₇₅	a ₇₆	a ₇₇	a ₇₈	a₇₈
a₈₁	a ₈₁	a ₈₂	a ₈₃	a ₈₄	a ₈₅	a ₈₆	a ₈₇	a ₈₈	a₈₈
a₈₁	a₈₁	a₈₂	a₃₃	a₈₄	a₈₅	a₈₆	a₈₇	a₈₈	a₈₈

Figura 2.8: Condições de contorno reflexivas para um autômato celular bidimensional.

	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈	
	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃	a ₂₄	a ₂₅	a ₂₆	a ₂₇	a ₂₈	
	a ₃₁	a ₃₂	a ₃₃	a ₃₄	a ₃₅	a ₃₆	a ₃₇	a ₃₈	
	a ₄₁	a ₄₂	a ₄₃	a ₄₄	a ₄₅	a ₄₆	a ₄₇	a ₄₈	
	a ₅₁	a ₅₂	a ₅₃	a ₅₄	a ₅₅	a ₅₆	a ₅₇	a ₅₈	
	a ₆₁	a ₆₂	a ₆₃	a ₆₄	a ₆₅	a ₆₆	a ₆₇	a ₆₈	
	a ₇₁	a ₇₂	a ₇₃	a ₇₄	a ₇₅	a ₇₆	a ₇₇	a ₇₈	
	a ₈₁	a ₈₂	a ₈₃	a ₈₄	a ₈₅	a ₈₆	a ₈₇	a ₈₈	

Figura 2.9: Condições de contorno fixas para um autômato celular bidimensional.

2.1.7 Exemplos de Autômatos Celulares

Alguns autômatos celulares ficaram bastante conhecidos, e/ou tiveram uma importância histórica considerável e serão brevemente apresentados nesta seção com objetivo de tornar mais claros os conceitos e definições apresentadas nas seções anteriores.

Autômato de Conway - Jogo da Vida

No autômato proposto por Conway, a vizinhança considerada é a de Moore, formada pela célula central e pelas oito primeiras células mais próximas. O estado de uma determinada célula é representado pelos valores binários (0) para a célula morta ou (1) para a célula viva.

As regras de atualização do autômato são as seguintes[47]:

1. Uma célula viva com 2 ou 3 vizinhos vivos, permanece viva no próximo passo de tempo;
2. Uma célula viva com apenas 1 ou 0 vizinhos vivos, morre no próximo passo de tempo;
3. Uma célula viva com 4 ou mais vizinhos vivos, morre no próximo passo de tempo;
4. Uma célula morta com exatamente 3 vizinhos vivos, renasce no próximo passo de tempo.

As regras foram escolhidas cuidadosamente, após um longo período de experimentações, para atender às seguintes premissas:

1. Não existir qualquer configuração inicial que possa crescer ilimitadamente;
2. Deve haver pequenas configurações iniciais que evoluam de maneira caótica e imprevisível;
3. Deve haver configurações iniciais que no decorrer do tempo evoluam para uma configuração que pode:
 - (a) Ser completamente eliminada;
 - (b) Assumir uma configuração estável;
 - (c) Entrar em ciclo por dois ou mais passos de tempo.

Existem configurações iniciais que originam algumas estruturas interessantes que podem ocorrer no Jogo da Vida. Estruturas do tipo vida parada (ou *still life* em inglês), permanecem inalteradas no decorrer do tempo. Na figura 2.10 são exemplificadas duas dessas estruturas, o bote em 2.10(a) e o bloco, composto por um quadrado de quatro células vivas, em 2.10(b).

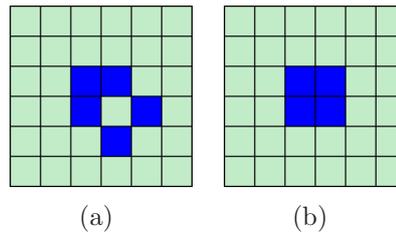


Figura 2.10: Exemplos de imagens paradas do jogo da vida. Observamos em (a) o bote e em (b) o bloco.

Também são estruturas interessantes as imagens oscilantes (ou *oscillators*, em inglês), que repetem um padrão em ciclos. O *blinker*, formado por três células vivas contíguas horizontais ou verticais isoladas que alternam as duas configurações é apresentado na figura 2.11, e o “sapo”, apresentado na figura 2.12, são exemplos de *oscillators* que possuem um ciclo de apenas duas gerações.

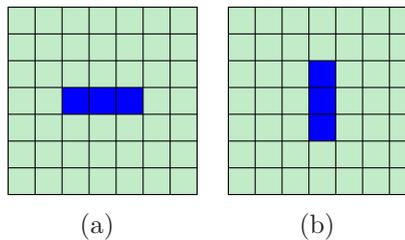


Figura 2.11: Exemplo de estrutura que oscila. As configurações (a) e (b) se alternam. Essa estrutura é também conhecida como “*blinker*”.

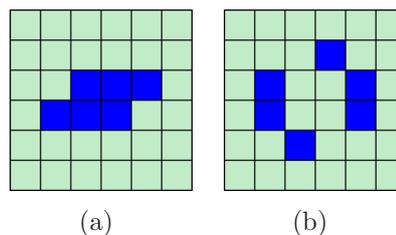


Figura 2.12: Exemplo de estrutura que oscila. As configurações (a) e (b) se alternam. Essa estrutura é também conhecida como “sapo”.

Há ainda estruturas que se movimentam, como as naves espaciais ou *spaceships* e os planadores ou *gliders*. *Spaceships* se movimentam para cima, para baixo, para a esquerda ou para a direita, enquanto *gliders* se movimentam horizontalmente. Um exemplo de evolução de uma *spaceship* é mostrado na figura 2.14. Os *gliders*, representados no exemplo da figura 2.13, podem ser vistos como padrões pseudo-estáveis que emergem de maneira auto-organizada na evolução do sistema. Algumas configurações iniciais específicas podem evoluir para os chamados “geradores de planadores” (ou *glider guns*, em inglês) que passam a produzir continuamente *gliders* em determinada direção.

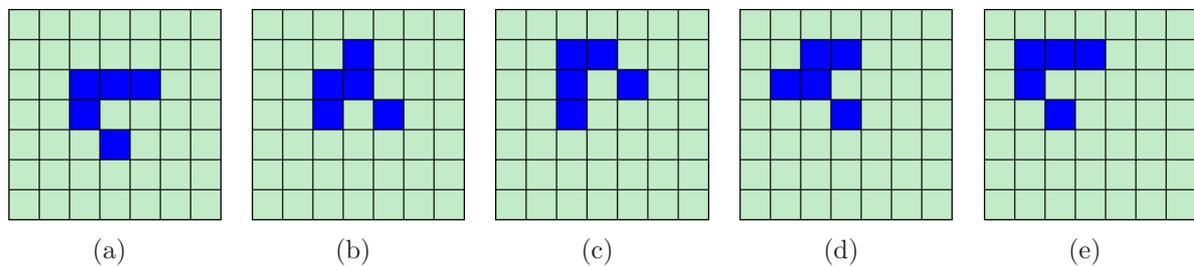


Figura 2.13: Exemplo de evolução de um *glider*. A estrutura do exemplo se desloca para cima e para a direita (ou seja, diagonalmente) após quatro passos de tempo.

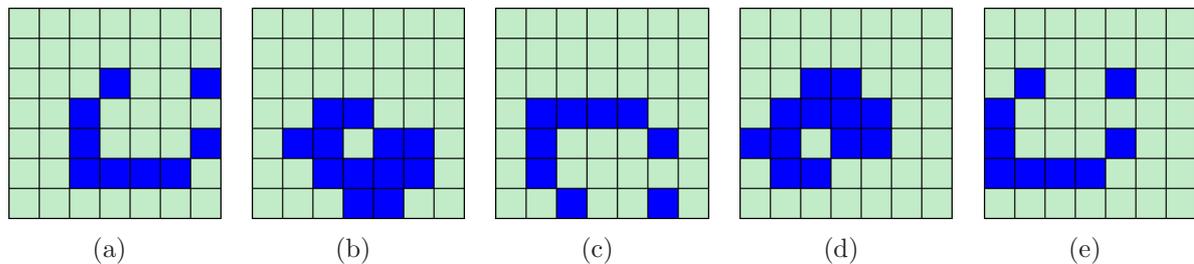


Figura 2.14: Exemplo de evolução de uma *spaceship*. A estrutura do exemplo se desloca para a esquerda após quatro passos de tempo.

Outra característica fundamental do Jogo da Vida é ser um computador universal, isto é, ele atende ao *Halting Theorem* (teorema do travamento), o qual assegura que não existe um algoritmo geral que possa prever quando um programa de computador irá parar ou continuar a rodar indefinidamente.

Autômato de Wolfram

Stephen Wolfram[39] considerava os autômatos celulares como idealizações discretas das equações diferenciais parciais, que são bastante utilizadas na descrição de sistemas dinâmicos naturais. Essa natureza discreta também permite a analogia com processadores digitais, pois os autômatos celulares podem ser vistos como programas de processamento paralelo de construção simplificada.

Considera-se um sistema de autômatos celulares unidimensional com uma configuração inicial e uma regra específica para a evolução do autômato celular bem definidas. Um família de regras pode ser obtida permitindo que o estado da célula no instante $t + 1$ seja uma função dos estados da própria célula e das suas duas vizinhas mais próximas no passo de tempo anterior (t):

$$a_i^{(t+1)} = F(a_{i-1}^{(t)}, a_i^{(t)}, a_{i+1}^{(t)}), \quad (2.1)$$

onde o estado de uma célula na posição i no tempo t é $a_i^{(t)}$. Cada célula pode estar em 2 estados, assim, 3 células podem possuir $2^3 = 8$ configurações. Cada uma dessas configurações pode levar a 2 valores possíveis. Logo teremos $2^{2^3} = 256$ regras que definem diferentes autômatos celulares, com o número de regras possíveis dado por k^{k^z} para k estados e z vizinhos considerados. Essa família de 256 autômatos celulares elementares é conhecida como *regras de Wolfram*, e os números estão associados com cada regra pela *notação de Wolfram*².



Figura 2.15: Esquema de um estado inicial para um autômato celular cujo valor é dado por (1,0,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0)

Considerando um conjunto inicial de células, dado pela figura 2.15, e uma regra de mudança dos estados do conjunto inicial, teremos uma evolução de um autômato celular. Os valores 0 ou 1 são representados por quadrados em branco e quadrados em pretos respectivamente.

²A notação considera o valor binário com 8 dígitos do número dado pela regra e seu valor decimal. Por exemplo, a regra 22 é representada por 00010110

Uma regra muito simples para a evolução no tempo dos valores das células é

$$a_i^{(t+1)} = a_{i-1}^{(t)} + a_{i+1}^{(t)} \pmod{2} \quad (2.2)$$

onde $\pmod{2}$ indica que é tomado o resto 0 ou 1 da divisão por 2. De acordo com essa regra, o valor de uma célula, em particular, é dada pela soma módulo 2 (ou, equivalentemente ao *ou exclusivo* da álgebra Booleana) dos valores de suas células vizinhas à esquerda e à direita no passo de tempo anterior. Essa regra, pela notação de Wolfram, é a regra 90.

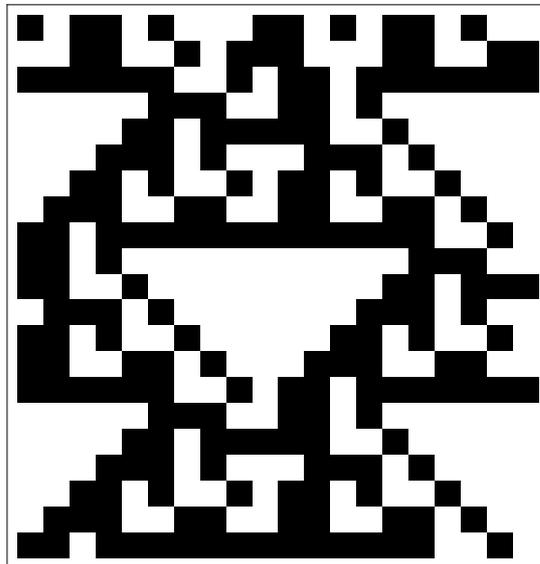


Figura 2.16: Evolução do estado inicial representado na 2.15 após 20 passos. A primeira linha apresenta a configuração inicial e as seguintes, a evolução temporal, de cima para baixo, usando condições de contorno periódicas.

Partindo da condição inicial dada pela primeira linha na figura 2.15 e da regra 90, dada pela equação 2.2 é gerado o padrão mostrado na figura 2.16, após 20 passos.

Um exemplo bastante utilizado para os autômatos celulares de Wolfram é a evolução da regra determinada pela equação 2.2, mas utilizando-se uma semente constituída de apenas uma célula central com valor 1 e as demais com valor 0. A figura 2.17 apresenta o padrão gerado pela evolução desse autômato em apenas 25 passos, e a figura 2.18 a evolução após 500 passos.

O padrão das figuras 2.17 e 2.18 apresentam algumas regularidades, uma dessas é a auto-similaridade (do inglês, *self-similarity*). Como mostrado na figura 2.18, porções

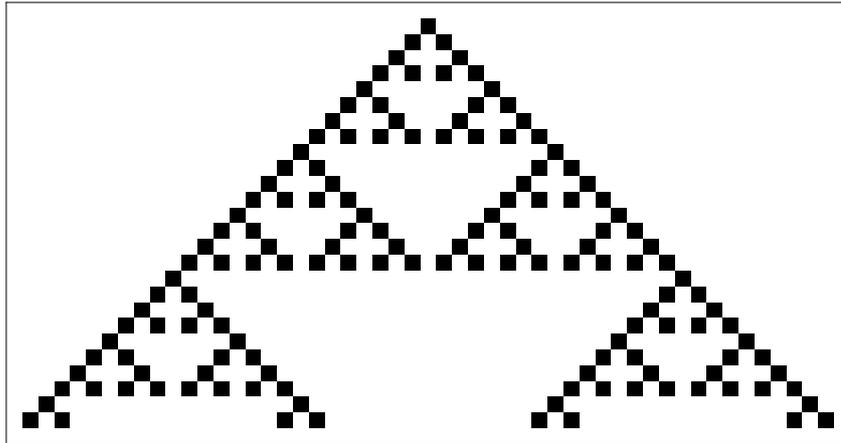


Figura 2.17: Evolução da regra 90 em 25 passos.

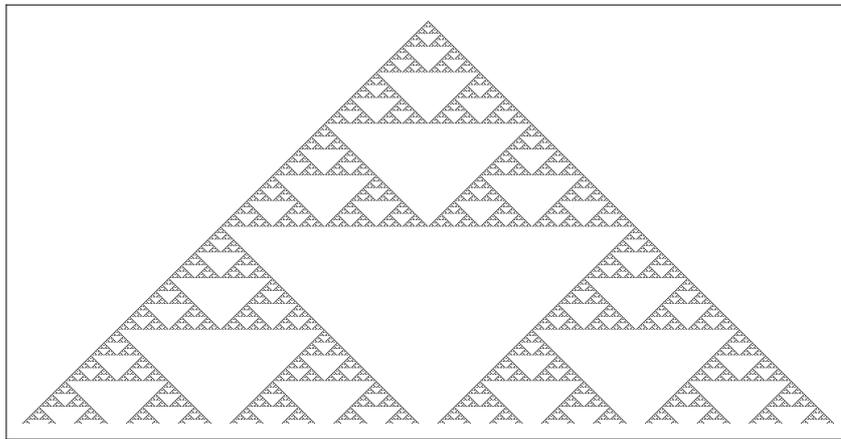


Figura 2.18: Evolução da regra 90 em 500 passos.

do padrão, quando aproximadas, são indistinguíveis do todo. Este padrão auto-similar é um objeto fractal chamado de “*Sierpinsky Gasket*” e pode ser caracterizado pela sua dimensão fractal, dentre outras propriedades. Muitos sistemas naturais exibem padrões com essas características e podem ser gerados através de autômatos celulares.

A figura 2.19 mostra a evolução desse modelo de acordo com a regra 90 dada pela equação 2.2 a partir de um estado inicial desordenado. Os valores das células e seu estado inicial são escolhidos aleatoriamente onde cada célula tem a mesma probabilidade de ter valor 0 ou 1, independentemente dos valores das outras células. Mesmo que o estado inicial não tenha uma estrutura específica, a evolução mostra emergência de alguns claros triangulares. O aparecimento espontâneo destes claros é um exemplo de auto-organização (do inglês, *self-organization*).

Enquanto muitos sistemas tendem à desordem, uma grande classe de sistemas apresentam a tendência inversa, gerando espontaneamente uma estrutura com o passar do tempo, mesmo iniciando a partir de estados desordenados ou desestruturados. O autômato celular na figura 2.19 é um exemplo de sistema auto-organizado.

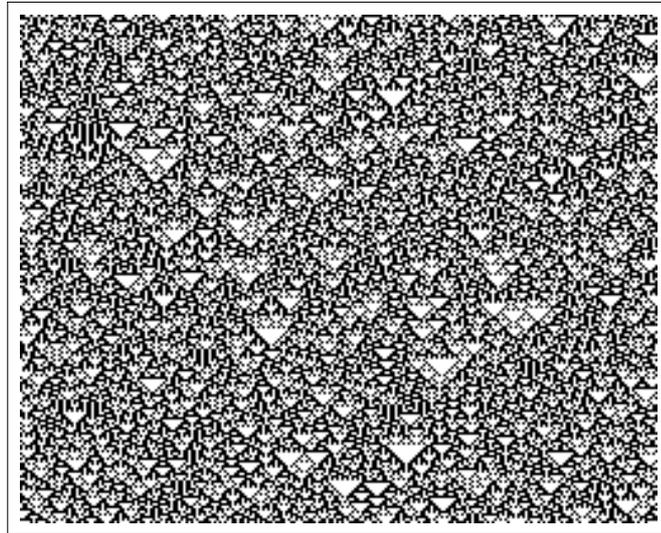


Figura 2.19: Evolução da regra 90 partindo de um estado inicial desordenado em 500 passos.

Um exemplo conhecido de um padrão natural que apresenta um comportamento de um sistema auto-organizado, está apresentado pela figura 2.20, que mostra a concha de *Conus textile*, um molusco gastrópode do gênero *Conus*. Observa-se a formação de figuras triangulares intercaladas por espaços preenchidos com cores nas conchas desses moluscos, imagens muito parecidas com a evolução de um autômato celular da regra 30 (figura 2.21).

Generalizando a ideia de que o estado do autômato depende apenas do estado das células que são suas primeiras vizinhas, possibilita-se que cada célula no autômato tenha um valor dentre um número arbitrário k de valores e, ainda, permite-se que o estado de uma célula dependa de estados de células vizinhas que estejam r células distantes, assim podemos generalizar a equação 2.1 como

$$a_i^{(t+1)} = F(a_{i-r}^{(t)}, \dots, a_{i+r}^{(t)}) \quad (2.3)$$

Cada regra leva a padrões de comportamento que diferem em detalhes mas, segundo Wolfram[39], todos os padrões tendem a cair em apenas quatro classes qualitativas.



Figura 2.20: Representação de um autômato celular natural, observado nos *Conus textile*.
Fonte: <http://www.en.wikipedia.org>, fotógrafo (richard@research.canon.com.au) Richard Ling.

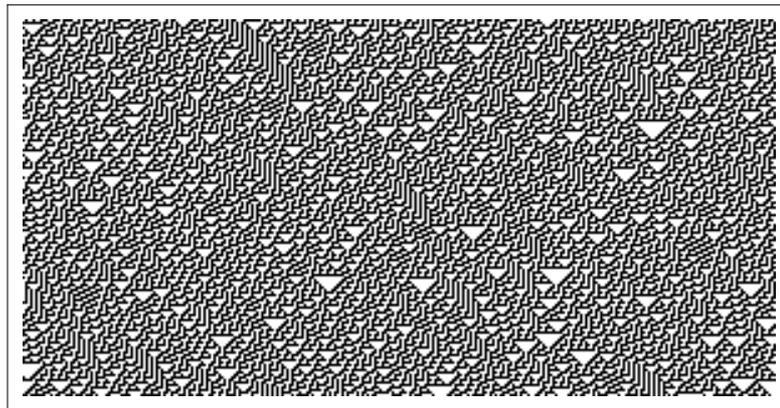


Figura 2.21: Evolução da regra 30 partindo de um estado inicial desordenado.

Assim, os autômatos celulares se dividem nestas quatro classes[39], com base nos padrões espaço-temporais gerados por sua evolução e são classificadas empiricamente como:

1. Classe I - Evolução gera estados homogêneos.
2. Classe II - Evolução gera um conjunto de estruturas estáveis e periódicas que são separadas e simples.
3. Classe III - Evolução gera padrões caóticos, aperiódicos;
4. Classe IV - Evolução gera estruturas complexas e, algumas vezes, de longa vida.

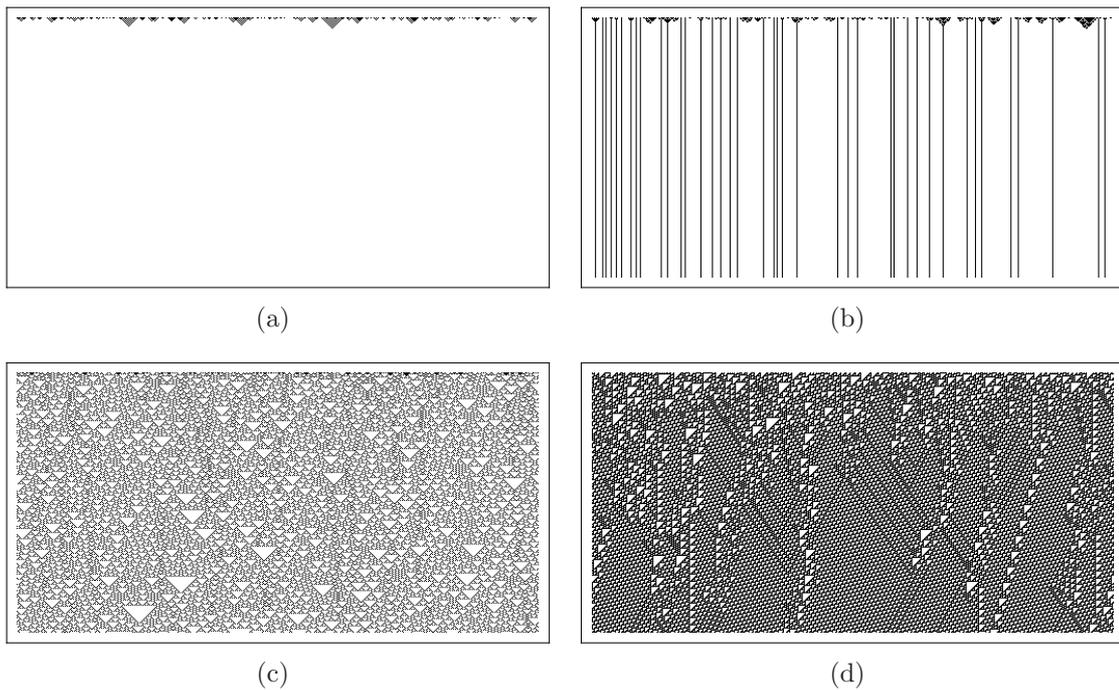


Figura 2.22: Padrões espaço-temporais característicos de regras típicas em cada uma das quatro classes de Wolfram. (a) Classe I - Evolução da regra 160 em 250 passos; (b) Classe II - Evolução da regra 164 em 250 passos; (c) Classe III - Evolução da regra 146 em 250 passos; (d) Classe IV - Evolução da regra 110 em 250 passos.

A figura 2.22 ilustra exemplos de comportamento de cada uma das classes de autômatos celulares, segundo a classificação de Wolfram, após 250 passos. Na classe I, apesar do estado inicial desordenado, o sistema evolui para um estado único e homogêneo, como apresentado na figura 2.22(a). A classe II tem a característica dos efeitos de uma célula, em particular, propagar-se somente a uma distância finita, ou seja, somente a um número finito de células vizinhas. Assim, os valores iniciais afetam somente uma região finita de células próximas produzindo estruturas estáveis após essa região finita, como exemplificado pela figura 2.22(b).

Na classe III, as mudanças no estado inicial afetam células mais distantes. Com o estado inicial sendo desordenado, as mudanças apresentam uma sucessão caótica. A figura 2.22(c) exemplifica esse comportamento. A classe IV apresenta um padrão complexo, onde a transmissão da informação ocorre irregularmente em larga escala espaço-temporal. A figura 2.22(d) exemplifica esse comportamento.

A existência de somente quatro classes qualitativas implica na universalidade do comportamento do autômato celular e muitas características dependem somente da classe que o autômato pertence e não de detalhes precisos da sua evolução[39].

2.2 Modelo Proposto para Incêndios Florestais

O objetivo desta dissertação é investigar o papel dos incêndios florestais na estrutura etária das árvores de uma floresta e, para isso, propomos um modelo de Autômatos Celulares simples para uma floresta composta por apenas uma espécie de árvores, mas com o grau de resistência à ignição de cada uma das árvores associado à sua idade.

O modelo proposto é uma extensão do modelo proposto por Camelo-Neto e Coutinho que possuía duas populações de árvores, resistentes e permissivas, voltado para a análise da quebra da criticalidade auto-organizada quando comparado ao modelo de Drossel e Schwabl, formado por florestas com uma população homogênea de árvores permissivas. Para isso, nesses últimos dois modelos, o interesse constituiu em analisar as distribuições de tamanho e duração das queimadas no estado estacionário alcançado pelos modelos. O modelo proposto para simulações de incêndios florestais desta dissertação foi desenvolvido utilizando-se a linguagem *C* de programação.

No modelo, considera-se uma rede quadrada de tamanho $L \times L$ onde em cada sítio localiza-se um autômato cujos possíveis estados são: AR = árvore natural com grau de resistência R , C = árvore em chamas e V = árvore queimada ou espaço vazio. Para o estado AR são considerados 8 graus de resistência à queima ($R = 1$ a 8), levando-se em consideração a idade das árvores. Nesse caso, a idade de cada árvore determina o seu grau de resistência à ignição de tal maneira que árvores mais novas ou muito velhas são mais susceptíveis à queima do que aquelas à meia idade.

2.2.1 Regras Dinâmicas do Autômato Celular

O modelo considera uma vizinhança de Moore com raio $\mathcal{R} = 1$ e portanto 8 vizinhos para cada autômato. O grau de resistência é determinado por R que pode variar de $R_{min} = 1$ a $R_{max} = 8$, e muda de valor a cada evolução temporal de duração τ (em anos).

A taxa de recomposição da população de árvores é fixada pela probabilidade p que o estado V de um autômato seja substituído por $A1$ no próximo passo de tempo. Por outro lado, a ocorrência de raios é determinada pela probabilidade f . Portanto, p e f definem as escalas dinâmicas de tempo do modelo, uma vez que $1/p$ corresponde ao tempo médio para o processo natural de aparecimento de uma árvore em um espaço vazio, enquanto

$1/f$ corresponde ao tempo médio de queda de um raio em alguma célula ocupada em uma floresta. Em geral, $p \gg f$. Finalmente, a escala de tempo para a propagação do incêndio entre duas árvores vizinhas define a unidade de tempo do autômato (ou passo). Os sítios mudam de estado de acordo com regras pré-determinadas, e levando em consideração o limite $p/f \rightarrow \infty$. Nesse limite, a probabilidade de interação entre dois incêndios é nula.

Todas as células são atualizadas de acordo com as seguintes regras:

1. Um espaço vazio (estado V) passa ao estado de árvore natural com grau de resistência $R = 1$ (estado $A1$) com probabilidade p , no próximo passo de tempo.
2. Uma árvore natural (estado AR) passa ao estado C com probabilidade f no próximo passo de tempo e/ou se tiver pelo menos R vizinhos no estado C .
3. Uma árvore em chamas (estado C) passa para o estado V no próximo passo de tempo.

Para a evolução do grau de resistência de acordo com a idade, os autômatos no estado AR seguem às seguintes regras:

4. Uma árvore no estado $A1$ passa ao estado $A2$ após τ passos de tempo, e assim sucessivamente até alcançar o estado $A8$.
5. Uma árvore no estado $A8$ passa ao estado $A7$ após T_{vida} passos de tempo e em seguida para o estado $A6$ após τ passos de tempo, e assim sucessivamente até alcançar o estado $A1$, permanecendo nesse estado até eventualmente passar ao estado C segundo a regra 2.

De acordo com as regras para a dinâmica do sistema, uma árvore pode brotar em uma célula vazia com probabilidade p ou pode ficar em chamas com probabilidade f , como esquematizado na figura 2.23.

O sistema evolui em passos Monte Carlo (MC) e, a cada passo, o estado de todos os autômatos do sistema é atualizado de maneira síncrona. A propagação dos incêndios ocorre quando uma árvore no estado AR se torna queimada, no próximo passo de tempo, quando tem pelo menos R vizinhos em chamas (estado C). Caso o número de vizinhos em chamas seja menor que R , este estado permanece como árvore natural manifestando

assim sua resistência à ignição. No próximo passo de tempo, todos os sítios que estavam em chamas tornam-se vazios. Um exemplo de evolução do sistema é mostrado na figura 2.24.

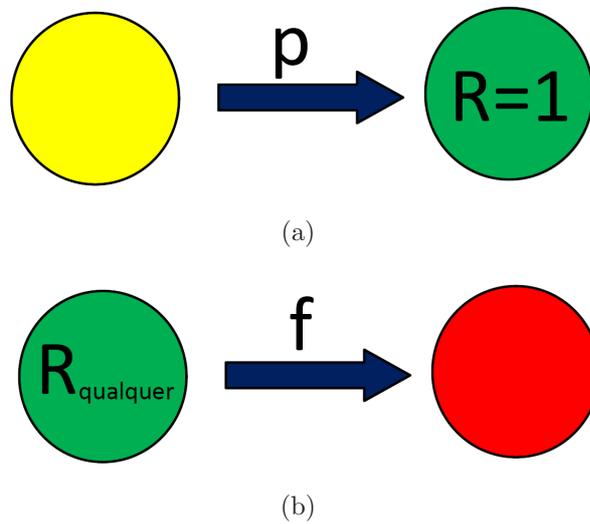


Figura 2.23: Regras de (a) nascimento e (b) ignição espontânea.

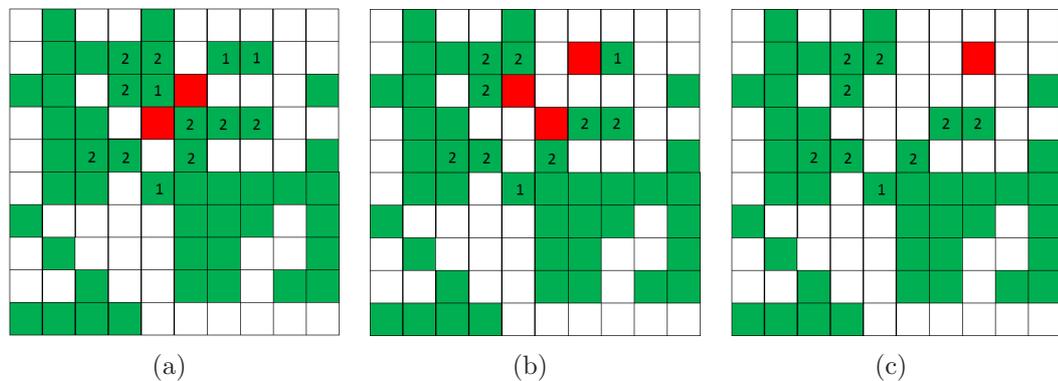


Figura 2.24: Exemplo de evolução. As células em vermelho são sítios em chamas, em verde são árvores naturais com a resistência indicada. Células em branco representam espaços vazios. A evolução do sistema começa em (a) e evolui respectivamente para (b) e depois (c).

A evolução da resistência das árvores à queima é dada pela idade das árvores. Árvores mais novas são mais susceptíveis a incendiarem por serem menores e terem um tronco mais estreito, devido a menos anéis de crescimento formados. A medida que a árvore vai envelhecendo ela vai crescendo e aumentando o número de anéis em seu tronco e assim vai se tornando mais resistente à queima. Os anéis são formados após certo

tempo devido a atividade cambial[48] e, no modelo, isso é considerado aumentando-se a resistência da árvore após certo número de passos temporais.

Quando as árvores chegam a maturidade a atividade cambial diminui[48] atingindo sua máxima resistência ao fogo. Nesse caso, a árvore, apesar de prosseguir envelhecendo, permanece com o mesmo grau de resistência, não diferindo em relação às outras árvores maduras mais novas. Finalmente, após certo período de tempo dado por T_{vida} (tempo de vida), as árvores vão envelhecendo e suas folhas se tornando mais secas, o tronco também vai secando e assim se tornam mais susceptíveis à queima. No modelo proposto, esse processo é simulado considerando-se que árvores ocorre um decaimento no grau de resistência das árvores com a taxa de uma unidade para cada τ passos de tempo. A dependência do grau de resistência com o tempo pode ser melhor visualizado na figura 2.25.

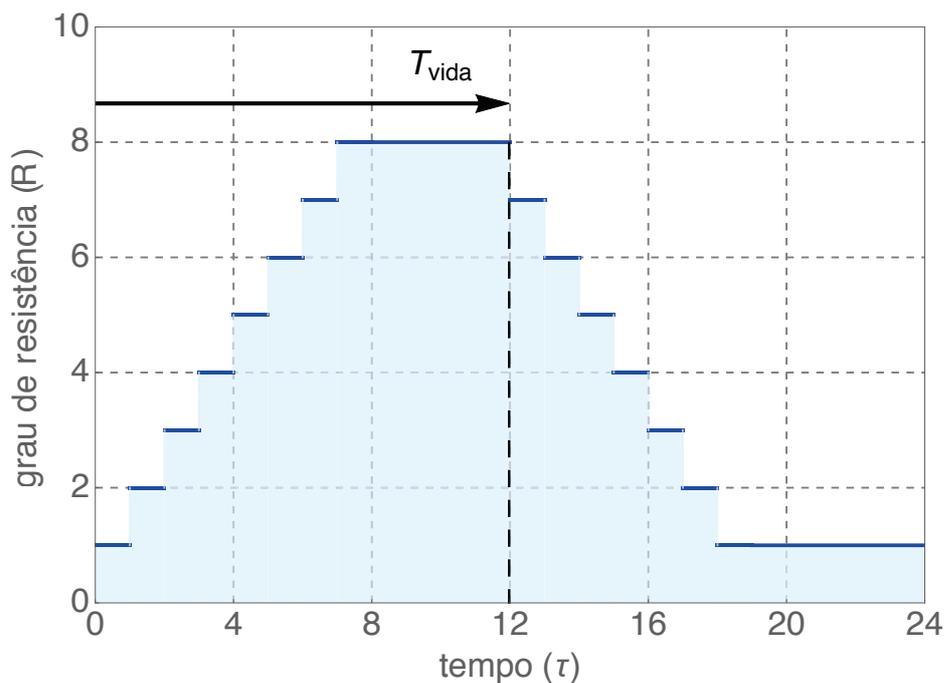


Figura 2.25: Gráfico do grau de resistência R em função do tempo τ para uma árvore, após o brotamento, para o caso particular do tempo de vida = $T_{vida} = 12\tau$.

2.2.2 Simulações

As simulações computacionais foram realizadas inicialmente em um computador com processador Intel Pentium G620, com memória RAM de 2GB DDR3. Essas primeiras simulações foram realizadas com redes pequenas, apenas para testes. As simulações finais com tamanho de rede maior e grande número de passos MC foram realizadas utilizando-se o cluster do Laboratório de Física Teórica e Computacional (LFTC) do Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco.

As simulações foram realizadas com diversos valores de passos MC. O valor máximo utilizado, em uma rede com $L = 5.000$, foi de $T_{max} = 150.000$ passos MC, com duração de aproximadamente 250 horas de CPU para cada programa rodado. Algumas simulações adicionais foram realizadas, mas em uma rede com $L = 500$, para até $T_{max} = 10^6$ passos MC. Nesse caso, as simulações ocorreram em aproximadamente 6 horas de CPU.

O programa utilizado foi escrito em linguagem de programação *C* e tem duas versões. A primeira é uma versão com interface gráfica baseada na biblioteca Xlib, mostrando uma rede de tamanho $L = 200$ onde observa-se células com diferentes cores. Alguns registros típicos estão mostrados nas figuras 2.26 e 2.27. Cada cor representa o grau de resistência de uma determinada árvore, com exceção da cor vermelha que representa os sítios incendiados e da cor branca que representa os sítios vazios respectivamente. As figuras 2.26, 2.27, 2.28 e 2.29 apresentam capturas de tela retiradas do programa com versão gráfica.

Na figura 2.26, observamos a captura de tela onde nota-se claramente a frente de fogo de um incêndio em andamento, com sítios marcados em vermelho. Na figura 2.27, observamos uma captura de tela onde há uma grande diversidade de árvores com diferentes graus de resistência.

Na figura 2.28, observam-se capturas de tela mostrando alguns instantes de tempo diferentes do programa em andamento com $\tau = 80$. Nessa figura, observamos a evolução do grau de resistência, evidenciado pelas diferentes cores de um instante para outro. As cores mais escuras representam valores de graus de resistência maiores. Nessa sequência temporal observa-se claramente a formação de ilhas de árvores com altos graus de resistência (mostrados em cor mais escura) cada vez maiores, sugerindo que a floresta não alcançou o regime estacionário.

Na figura 2.29, observam-se duas capturas de tela do programa sendo rodado com

$\tau = 50$ em instantes de tempo diferente. Assim como na figura 2.28, podemos notar as mudanças no grau de resistência das árvores na figura 2.29.

A segunda versão do programa possui os mesmos passos do programa anterior, mas sem a interface gráfica. Este foi o programa utilizado para a aquisição dos dados utilizados nessa dissertação.

Consideraremos os limites onde há a separação de escalas de tempo nos quais o modelo proposto por Drossel e Schawbl apresenta uma possível criticalidade auto-organizada, e onde o modelo original, proposto com Camelo-Neto e Coutinho, foi considerado. Esses limites são dados por $1/f \rightarrow \infty$ e $1/p \rightarrow \infty$ com $p/f \rightarrow \infty$. Nesses limites há dois períodos bem definidos, o período de incêndio e o período de crescimento.

No período de incêndio, quando um incêndio é iniciado, ele se espalha pela rede seguindo as regras de resistência para as árvores. O período de crescimento, que se caracteriza por uma relaxação do sistema após a ocorrência de um incêndio, é o período entre dois incêndios consecutivos. O limite $1/p \rightarrow \infty$ estabelece que o período de incêndio é suficientemente pequeno se comparado ao tempo médio de nascimento de duas árvores, garantindo que nenhuma árvore nova será adicionada à rede durante o incêndio. O limite $1/f \rightarrow \infty$ estabelece que o tempo médio entre dois incêndios consecutivos é muito grande se comparado ao período do incêndio, e assim a probabilidade de haver dois incêndios ao mesmo tempo na rede é praticamente nula. Em média p/f árvores nascem durante o período de crescimento, antes que um novo incêndio seja iniciado.

O programa utiliza um procedimento para otimizar o tempo de simulação. É escolhido um sítio aleatório na rede, se ele estiver ocupado por uma árvore, a árvore é incendiada e o incêndio se propaga conforme as regras de propagação estabelecidas. Se, contudo, o sítio estiver vazio, serão escolhidos p/f novos sítios, sendo plantada uma árvore em cada sítio vazio encontrado. A repetição desse processo L^2 vezes representa um passo monte carlo.

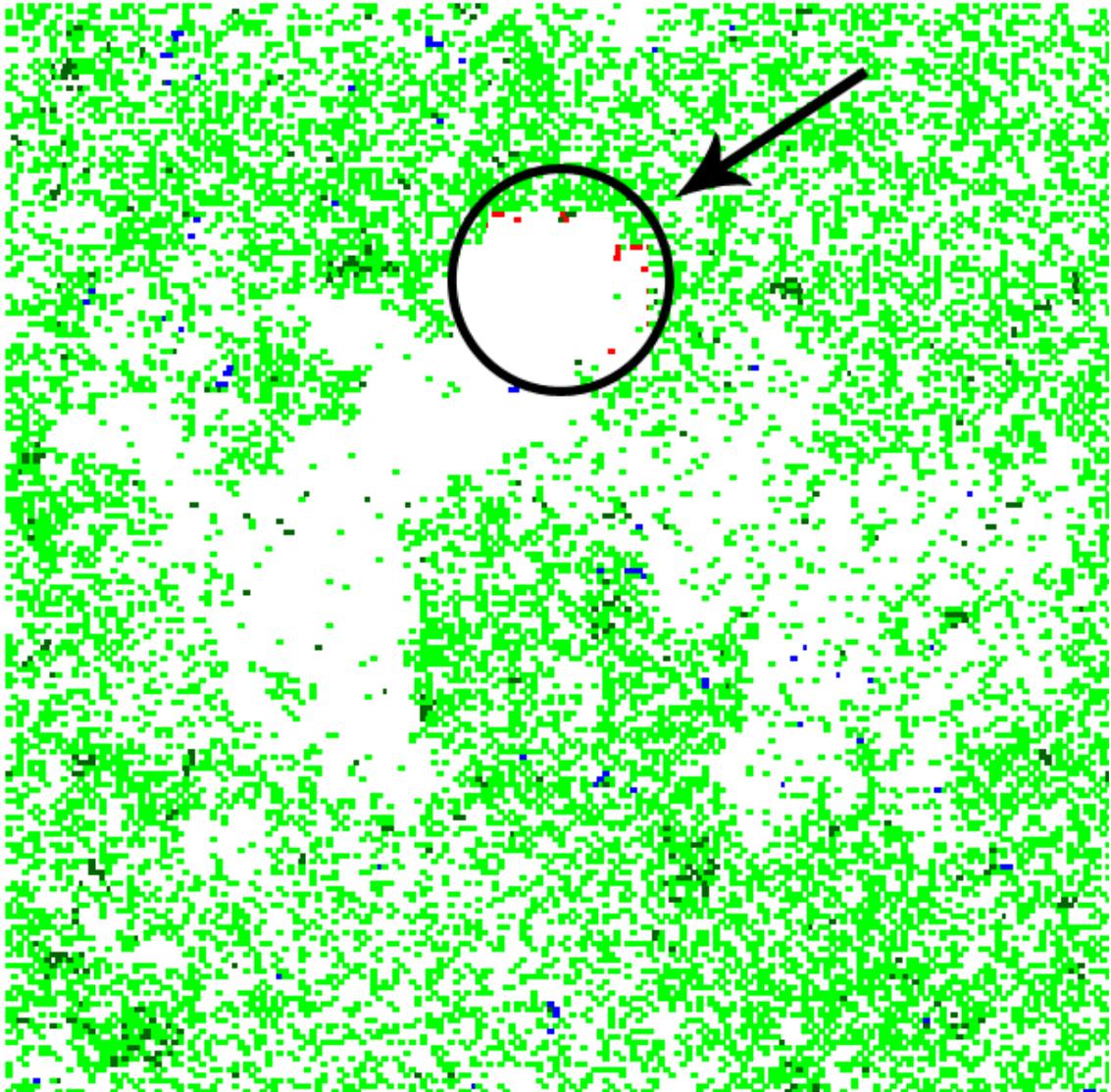


Figura 2.26: Captura da tela do programa com versão gráfica. Parâmetros utilizados: $\tau = 90$, $T_{vida} = 10\tau$, $p = 0,01$, $f = 0,0001$. As diferentes cores determinam os graus de resistência das árvores, exceto os sítios em vermelho que representam árvores em chamas e os sítios em branco que representam espaços vazios respectivamente.

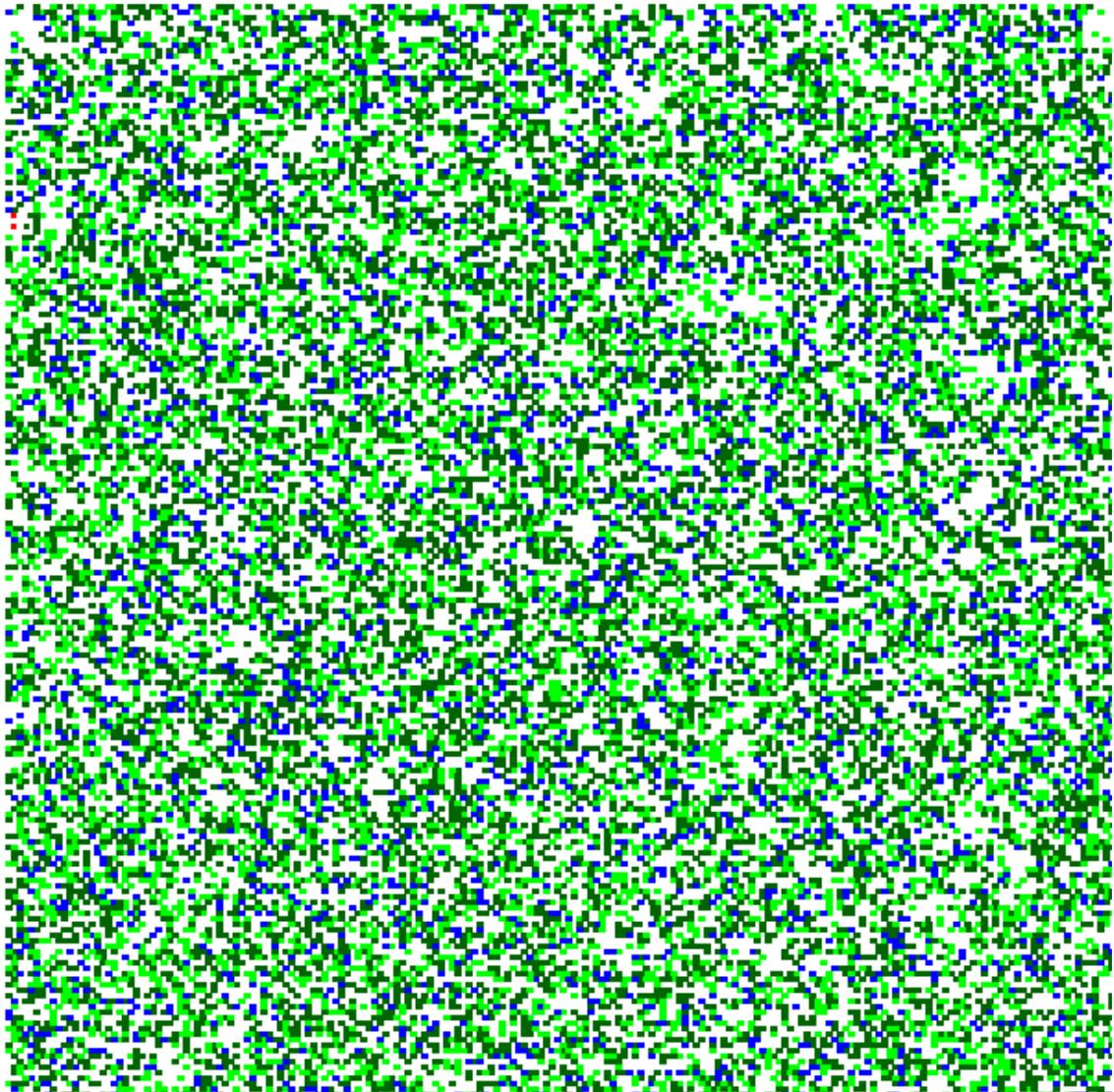


Figura 2.27: Captura da tela do programa com versão gráfica. Parâmetros utilizados: $\tau = 30$, $T_{vida} = 10\tau$, $p = 0,01$, $f = 0,0001$. Há uma grande diversidade de árvores com diferentes graus de resistência na floresta mostrada pela figura.

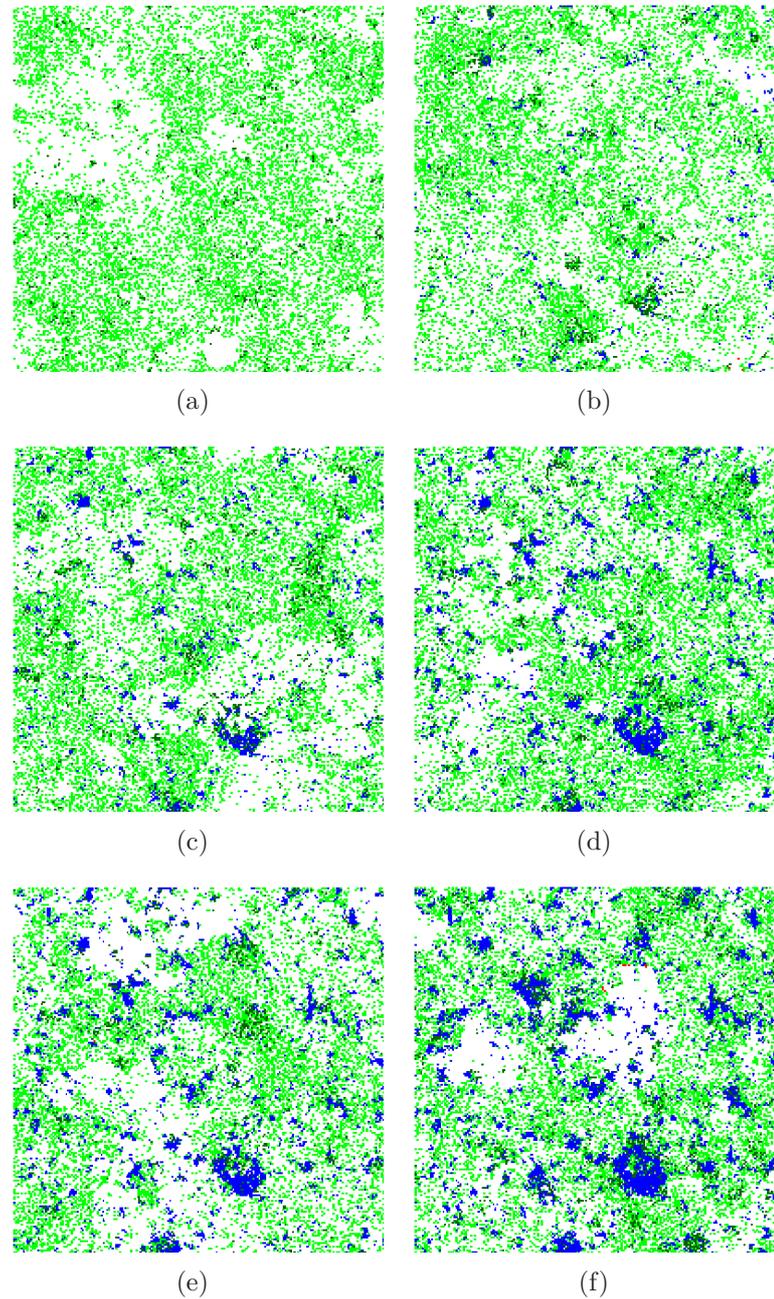
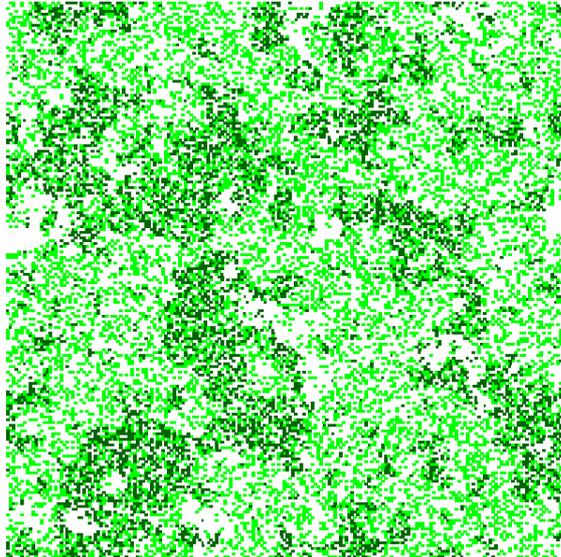
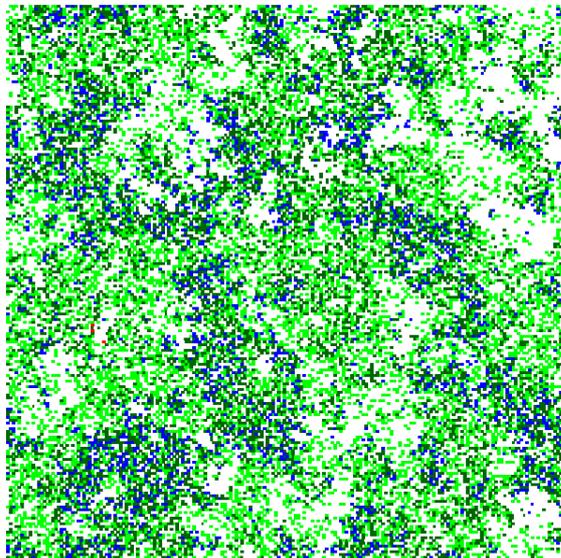


Figura 2.28: Capturas da tela do programa com versão gráfica. Parâmetros utilizados: $\tau = 80$, $T_{vida} = 10\tau$, $p = 0,01$, $f = 0,0001$. Em (a) está representada a rede em um dado instante e em (b), (c), (d), (e) e (f) em instantes posteriores a (a), estando em ordem temporal crescente.



(a)



(b)

Figura 2.29: Capturas da tela do programa com versão gráfica. Parâmetros utilizados: $\tau = 50$, $T_{vida} = 10\tau$, $p = 0,01$, $f = 0,0001$. Em (a) está representada a rede em um dado instante e em (b) a rede em um instante posterior ao mostrado em (a).

2.2.3 Dados Coletados

O programa elaborado e utilizado para realizar as simulações desta dissertação considera diversos parâmetros a serem escolhidos criteriosamente.

Tamanho da Rede

Simulações com vários tamanhos L de rede foram utilizados. Para alguns dados, um tamanho $L = 500$ foi suficiente para obter bons resultados, contudo, grandezas como as densidades das árvores apresentavam grandes oscilações com redes menores. Além disso, a distribuição de densidades de incêndios é fortemente sensível ao tamanho da rede. Para obtenção desses dados, visto que não era nosso objetivo calcular expoentes relacionados a algum comportamento típico de lei de potência para a distribuição de tamanhos de incêndios, redes com tamanho $L = 5.000$ foram suficientes.

Parâmetros e escalas de tempo

O modelo descrito nessa dissertação considera os seguintes parâmetros que definem a dinâmica do modelo: p , f , τ e T_{vida} . Os parâmetros p e f definem as escalas de tempo do modelo que, para atender às condições discutidas na seção 2.2.2, foram ajustadas para $p = 0.01$ e $f = 0.0001$.

Florestas temperadas não possuem uma grande diversidade de espécies vegetais, mas possuem as estações do ano bem definidas. Considerando esses dois fatores, o modelo leva em consideração o crescimento dos anéis que, como discutido na seção 1.1.1, ocorre mais visivelmente em locais com as estações do ano bem definidas. Além disso, existem florestas que possuem uma pequena diversidade de espécies, onde apenas uma delas é predominante em relação às outras[7]. Dessa forma, o modelo reproduz bem esse tipo de ambiente florestal, tendo uma espécie predominante com seu grau de resistência evoluindo de acordo com o crescimento dos anéis e as estações do ano.

O tempo de vida do modelo (T_{vida}), sendo o tempo decorrido até que o grau de resistência da árvore comece a decair, somado ao tempo que a árvore leva para chegar a uma resistência mínima ($R = 1$) nos dá o tempo médio de vida de uma árvore. Considerando esse tempo médio de vida como sendo da ordem de 10^2 anos, o valor desse parâmetro para o modelo é de $T_{vida} \simeq 100$ anos, considerando o intervalo de tempo para o incremento do grau de resistência da ordem de 10 anos. Assim:

$$T_{vida} \simeq 100 \text{ anos} \simeq 10\tau \quad (2.4)$$

com

$$\tau \simeq 10 \text{ anos} \quad (2.5)$$

os valores de τ e T_{vida} foram ajustados. Desta maneira, os parâmetros do modelo poderão ser ajustados para qualquer espécie de árvores de acordo com seu tempo de vida médio e características de robustez ao fogo.

Com τ sendo da ordem de 10 anos, consideramos um passo Monte Carlo como sendo um período de pouco mais de um mês. Dessa forma, o período que corresponde a um $T_{max} = 75.000$ passos Monte Carlo será de aproximadamente $7,6 \times 10^3$ anos, portanto uma escala razoável para a evolução de uma floresta.

Sendo assim, foram coletados dados com os parâmetros descritos e para $T_{max} = 75.000$. Eventualmente foram coletados dados com valores de T_{max} maiores, mas apenas para comparações gerais do modelo. Os valores razoáveis de τ para essas escalas de tempo são de $\tau = 70$ a $\tau = 110$ (em passos MC), uma vez que o valor do passo MC muda a cada valor de τ utilizado. Por exemplo, para $\tau = 96$, o passo MC corresponde a aproximadamente 37 dias. Para $\tau = 90$ o passo MC corresponde a aproximadamente 40 dias, e para $\tau = 100$ o passo MC corresponde a aproximadamente 36 dias. Os valores de τ utilizados variaram de $\tau = 70$ a $\tau = 110$ onde a mudança nos valores de τ , embora não significativos do ponto de vista da escala para o intervalo de τ utilizado, será determinante na evolução para o estado estacionário da floresta. As simulações foram realizadas utilizando essas faixas de valores dos parâmetros, e com variações a título de comparações, como os valores de T_{vida} utilizados que variaram de $T_{vida} = 8\tau$ a $T_{vida} = 16\tau$.

Capítulo 3

Discussão dos Resultados

*“Não importa quanto a vida possa ser ruim,
sempre existe algo que você pode fazer, e triunfar.
Enquanto há vida, há esperança.”*

[Stephen Hawking]

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do programa para incêndios florestais desenvolvido utilizando um modelo de Autômatos Celulares e que foi apresentado na seção 2.2 desta dissertação.

Iniciaremos essa discussão apresentando os resultados das distribuições das densidades e a evolução para os estados estacionários. Em seguida discutiremos os resultados dos histogramas de frequências de faixas etárias e graus de resistência para os casos obtidos neste trabalho.

3.1 Distribuição de densidades e evolução para estados estacionários

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para as distribuições das densidades e evolução para estados estacionários considerando os seguintes casos: modelo original com a resistência fixa, desenvolvido por Camelo-Neto e Coutinho[34]; modelo proposto sem decaimento de grau de resistência; e modelo proposto com decaimento de grau de resistência.

3.1.1 Modelo original com resistência fixa

Previamente, foi proposto um modelo de autômatos celulares[34, 49] onde duas populações de árvores possuem grau de resistência à ignição fixo, ou seja, o grau de resistência é uniforme para cada população de árvores e não considera o seu processo de envelhecimento. Nesse caso, o valor do grau da resistência de cada população se torna um parâmetro fixo do modelo. Nesse modelo foram consideradas duas populações de árvores, uma permissível e outra resistente: uma árvore que nasce possui resistência $R = 1$, sendo dita permissível, ou com resistência $R > 1$, sendo dita resistente, com suas respectivas taxas de recomposição dadas por $q \times p$ e $(1 - q) \times p$, q sendo uma fração entre menor ou igual a 1.

O modelo foi simulado para estudar a distribuição de queimadas para diferentes valores de resistência R , que tem o mesmo significado do grau de resistência usado no modelo proposto nesta dissertação, qual seja o número mínimo de vizinhos em chamas que seja suficiente para incendiar uma árvore no próximo passo de tempo. O caso $R = 1$ recupera o modelo DS e o caso $R = 2$ apresenta comportamento com lei de potência indicando que nesse caso a presença de árvores mais resistentes não é suficiente para alterar o comportamento crítico do estado estacionário. Com $R = 3$ o sistema apresenta um comportamento anômalo quando comparado aos dois primeiros casos e aos demais casos com $R = 4$ a 8. A figura 3.1, retirada da referência [34], mostra as diferenças de comportamento na evolução das densidades para quatro valores de R . Quando $R = 1$, a densidade de árvores flutua bastante, tendo uma grande susceptibilidade à perturbações externas causadas pelos incêndios, mantendo-se baixa, o mesmo comportamento ocorrendo para $R = 2$. Quando $R = 3$, onde há uma tendência de estabilização em um valor bem acima do obtido em $R = 1$, demonstrando que nesse caso o sistema se torna mais robusto à perturbações externas. Para valores de $R = 3 - 8$, as flutuações devido à ocorrência de incêndios (na maioria pequenos) é muito reduzida e a floresta evolui para um estado estacionário de alta densidade formado majoritariamente por árvores resistentes.

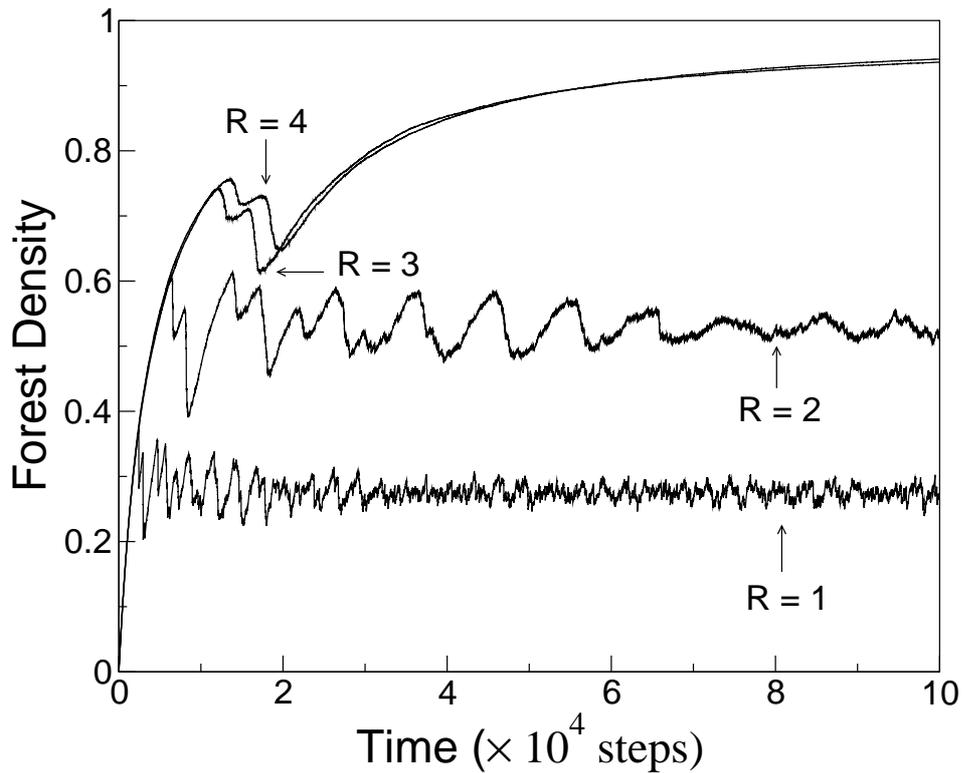


Figura 3.1: Evolução temporal da densidade de árvores na floresta para quatro diferentes valores de resistência. Parâmetros: $p/f = 10^5$ e $q = 0.5$. Rede com $L = 20.000$ [34].

3.1.2 Modelo sem decaimento do grau de resistência na senescência

O modelo original com graus de resistência fixos, acima apresentado, foi modificado de forma a introduzir heterogeneidade à floresta levando-se em conta o grau de resistência à ignição associado à idade das árvores, como o modelo descrito na seção 2.2 dessa dissertação. Nesse caso as simulações foram realizadas previamente considerando o parâmetro $T_{vida} \rightarrow \infty$. Assim, o grau de resistência das árvores, após aumentar um grau a cada τ passos de tempo chegando a $R = 8$, permanece fixo sem decair devido à senescência até que a árvore seja incendiada por um raio com probabilidade f ou por possuir 8 vizinhos em chamas. A evolução do grau de resistência para esse caso encontra-se esquematizado na figura 3.2.

Nesse caso particular, as árvores da floresta alcançam o grau máximo de resistência ($R = 8$) e a floresta torna-se bastante densa. A evolução para o estado estacionário ocorre muito rápido e a floresta não apresenta uma grande diversidade de árvores com diferentes resistências, e onde a maior parte de suas árvores possui o grau máximo de resistência. Nesse caso, a evolução temporal das árvores com grau de resistência de $R = 2$ a $R = 7$

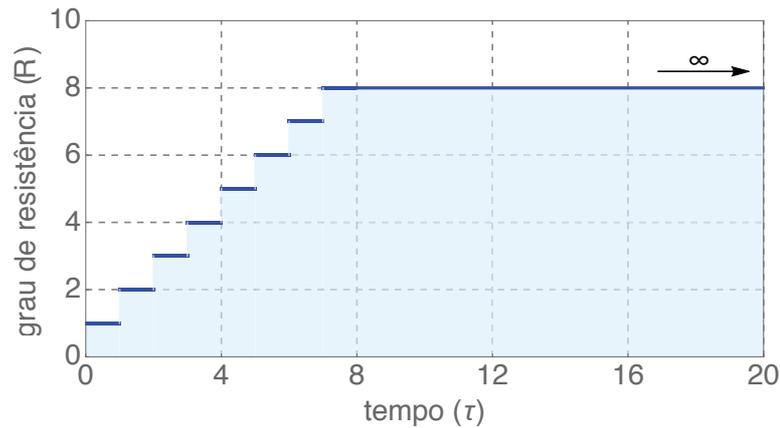


Figura 3.2: Gráfico do grau de resistência R em função do tempo τ para uma árvore, após o brotamento, para o caso particular onde a resistência alcança seu valor máximo ($R = 8$) e assim permanece.

possui o mesmo comportamento, diferindo dos comportamentos para $R = 1$ e $R = 8$.

As figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam gráficos que mostram a evolução das densidades de árvores, segundo cada grau de resistência, para alguns valores de τ (70, 80, 90 e 100). Comparando tais gráficos, observamos que esse aumento no valor de τ não altera o valor final das densidades do estado estacionário, variando apenas o transiente para o estado estacionário que aumenta quando τ cresce.

As fortes oscilações observadas no início das simulações são decorrentes da configuração inicial escolhida. Em todos os casos, a simulação é iniciada com uma rede totalmente vazia. Pelas regras do modelo o espaço vazio vai sendo populado até que um raio atinge um sítio ocupado provocando grandes incêndios, causando as oscilações na população de árvores predominantemente jovens ($R = 1$).

Após o período de fortes oscilações, a floresta apresenta num certo intervalo de tempo uma composição de árvores com graus de resistência variável entre $R = 1$ até $R = 8$, cada uma dessas populações apresentando um valor máximo deslocado de acordo com o crescimento de R .

Para os valores de τ simulados cada sistema converge apenas para o estado estacionário, onde a floresta mostra-se bem densa e com a maioria de suas árvores com grau de resistência máximo, $R = 8$. Esse fato fica mais evidente através das figuras 3.7 e 3.8, onde são mostradas imagens da parte central da rede em determinado instante nas quais as simulações foram realizadas com $T_{max} = 20.000$ passos MC. Esse valor de T_{max} em anos corresponde a $T_{max} \simeq 2.200$ anos e $T_{max} \simeq 2.800$ anos. Observa-se a estabilização

da densidade de sítios ocupados acima de 98%, o que se traduz em uma floresta bastante densa e, no caso específico do modelo sem decaimento de R , com mais de 90% desses estados ocupados com árvore de $R = 8$, e os demais, uniformemente distribuídos ao longo da rede.

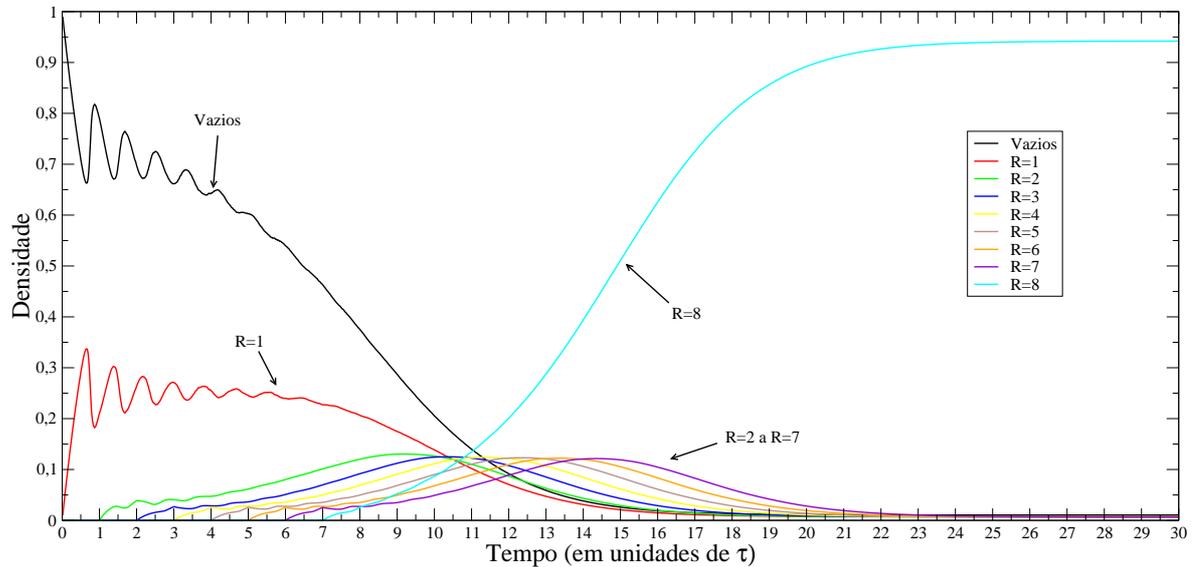


Figura 3.3: Evolução da densidade de sítios para os diferentes valores de resistência ao longo de cada iteração no modelo sem decaimento da resistência e numa rede com $L = 5.000$ para $T_{max} = 20.000$ passos MC. Parâmetros: $\tau = 70$, $p = 0,01$ e $f = 0,0001$.

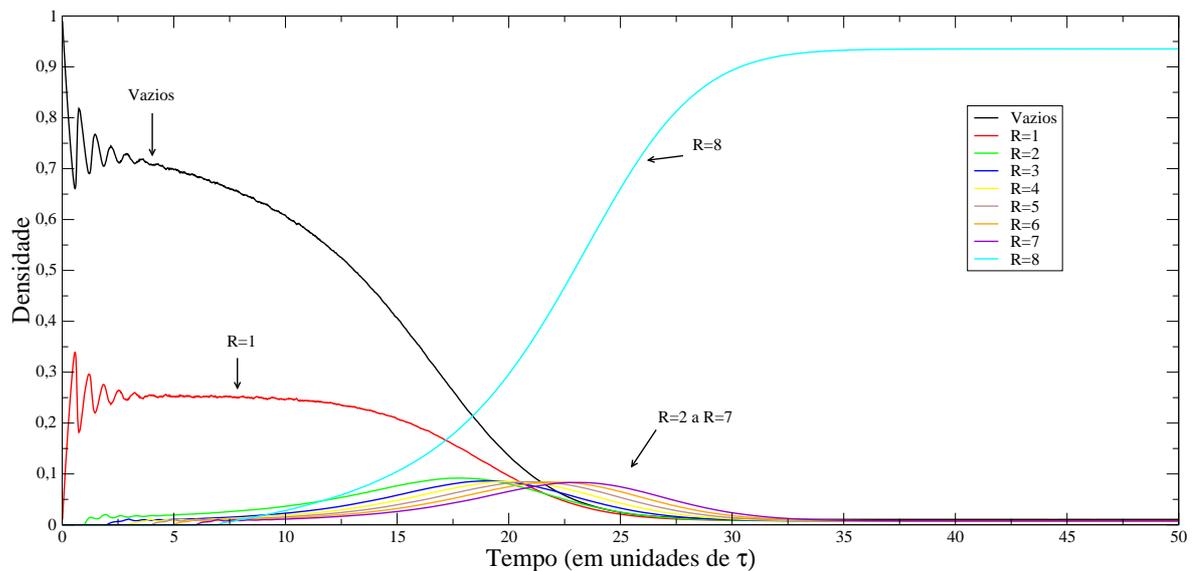


Figura 3.4: Evolução da densidade de sítios para os diferentes valores de resistência ao longo de cada iteração no modelo sem decaimento da resistência e numa rede com $L = 5.000$ $T_{max} = 20.000$ passos MC. Parâmetros: $\tau = 80$, $p = 0,01$ e $f = 0,0001$.

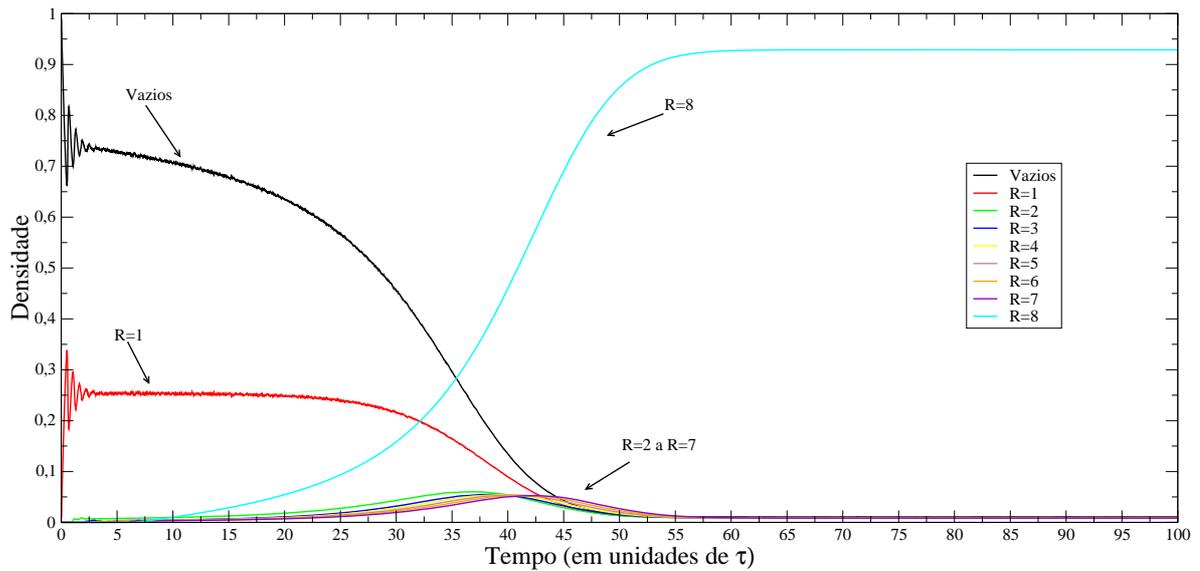


Figura 3.5: Evolução da densidade de sítios para os diferentes valores de resistência ao longo de cada iteração no modelo sem decaimento da resistência e numa rede com $L = 5.000$ $T_{max} = 20.000$ passos MC. Parâmetros: $\tau = 90$, $p = 0,01$ e $f = 0,0001$.

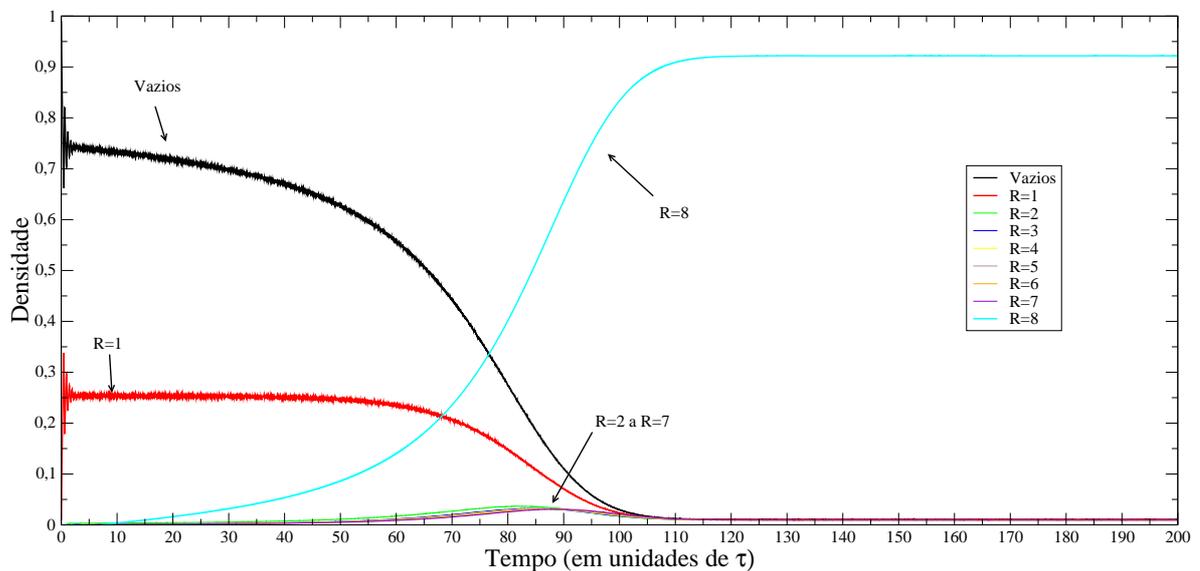


Figura 3.6: Evolução da densidade de sítios para os diferentes valores de resistência ao longo de cada iteração no modelo sem decaimento da resistência e numa rede com $L = 5.000$ $T_{max} = 20.000$ passos MC. Parâmetros: $\tau = 100$, $p = 0,01$ e $f = 0,0001$.

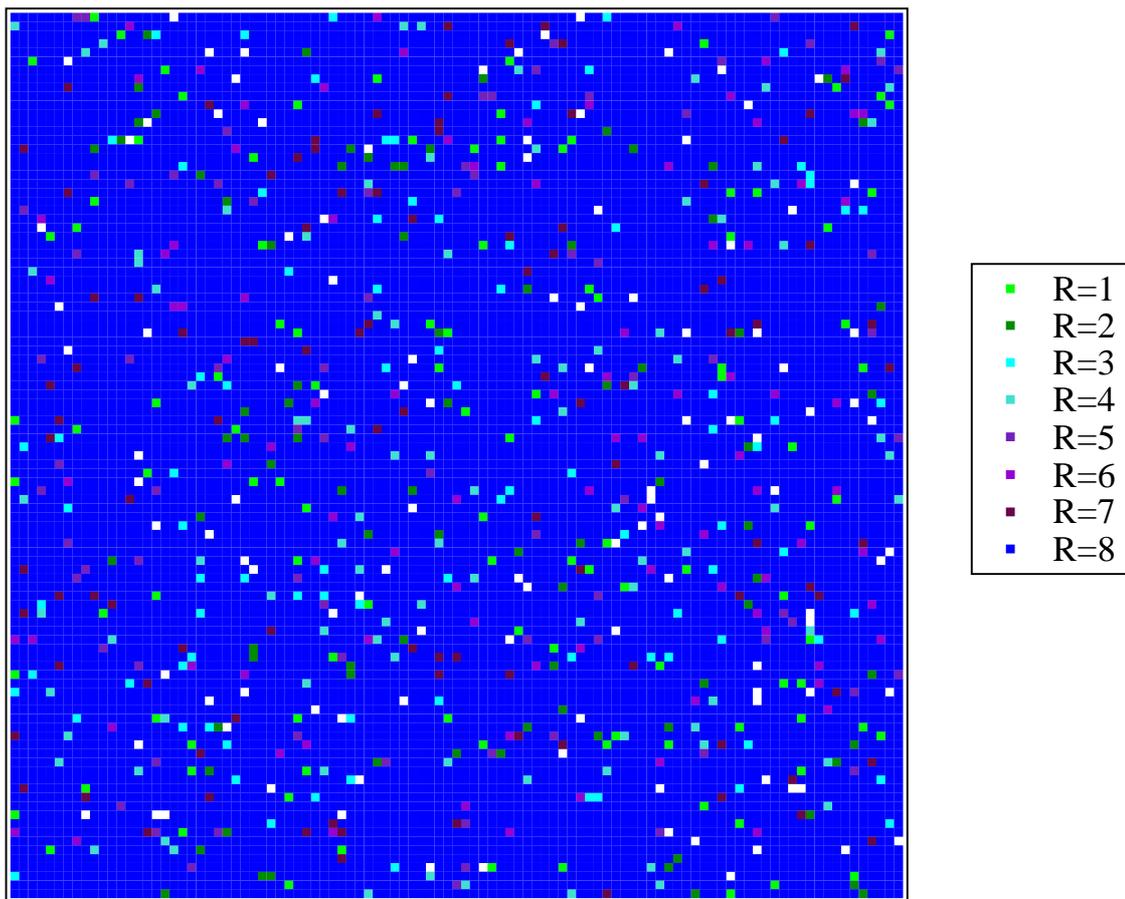


Figura 3.7: Parte central da Rede (com $L = 500$ originalmente). R são as resistências e estão apresentadas na legenda da figura. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 90$ e $T_{max} = 20.000$. Nesse caso, não há decaimento de R na senescência.

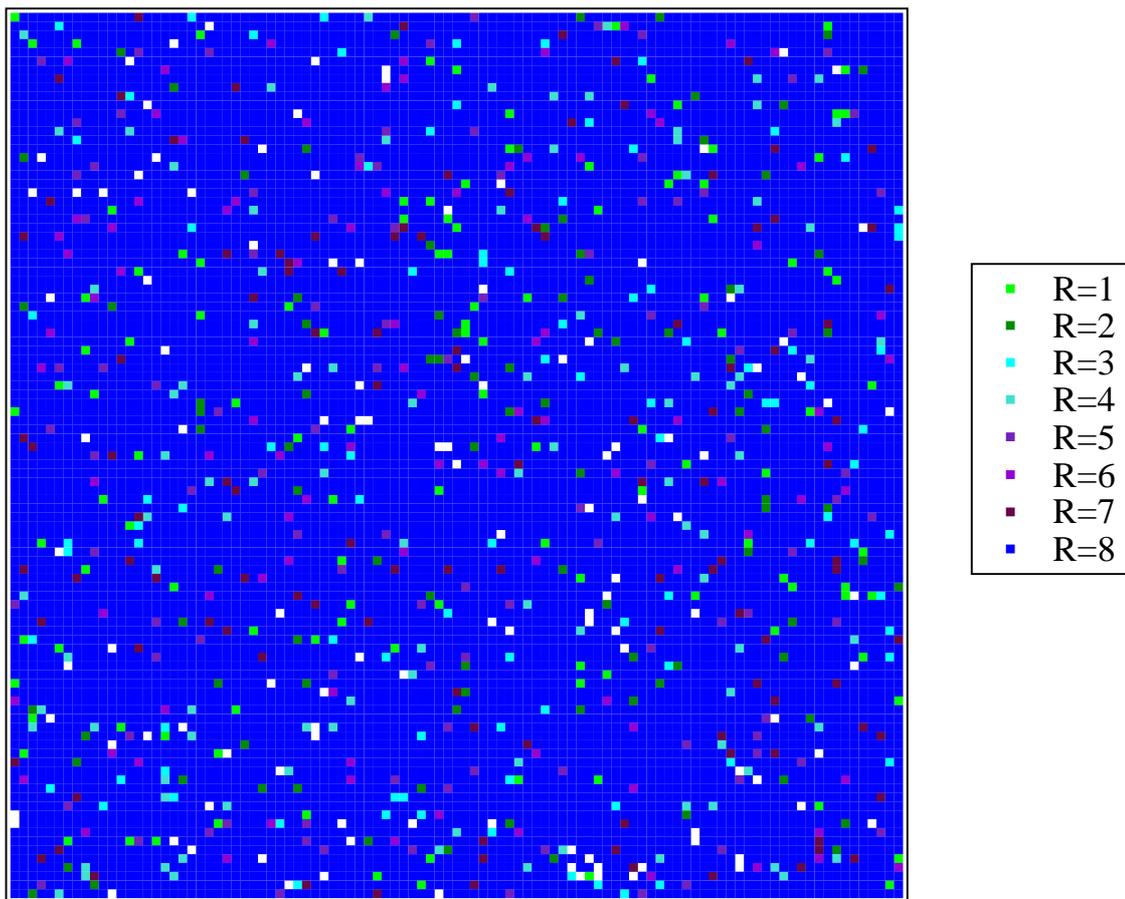


Figura 3.8: Parte central da Rede (com $L = 500$ originalmente). R são as resistências e estão apresentadas na legenda da figura. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 100$ e $T_{max} = 20.000$. Nesse caso, não há decaimento de R na senescência.

3.1.3 Modelo com decaimento do grau de resistência na senescência

Considerando o modelo com decaimento do grau de resistência após um período T_{vida} , foram realizadas simulações com valores de T_{vida} entre $T_{vida} = 8\tau$ e $T_{vida} = 16\tau$. Para o valor máximo simulado de T_{vida} , há uma estabilização no valor da densidade de sítios com $R = 8$ abaixo do valor encontrado no caso onde $T_{vida} \rightarrow \infty$, mas ainda acima da densidade de sítios com $R = 1$. O estado estacionário para esse caso não ocorre tão rápido quanto no caso sem decaimento de R , mesmo para um $T_{vida} = 16\tau$, observado na figura 3.9 para $\tau = 96$, quando comparado com a figura 3.5.

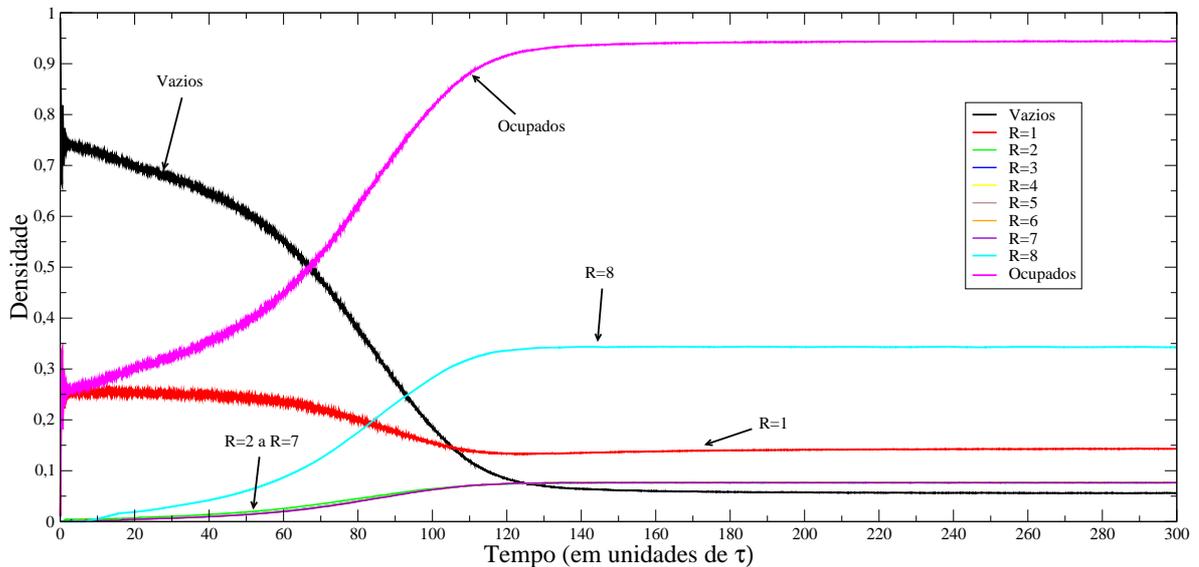


Figura 3.9: Evolução da densidade de sítios em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$, $T_{vida} = 16\tau$.

O valor mínimo utilizado de τ foi de $\tau = 70$ e a evolução das densidades é apresentada no gráfico da figura 3.10, exibindo fortes oscilações durante todo o período transiente. Para $T_{vida} = 10\tau$, a estabilização ocorre no valor próximo quando 90% dos sítios estão ocupados.

O estado estacionário alcançado para esse valor de τ evidencia uma floresta densa, com muitas árvores de diferentes graus de resistência. Esse estado estacionário será doravante chamado de estado de Floresta Densa (FD). No gráfico da figura 3.11 observamos a evolução das densidades para um valor de $\tau = 96$ e de $T_{vida} = 10\tau$. Nesse gráfico,

assim como no gráfico para $\tau = 70$, a densidade estacionária total de todas as classes é aproximadamente 90% de sítios ocupados.

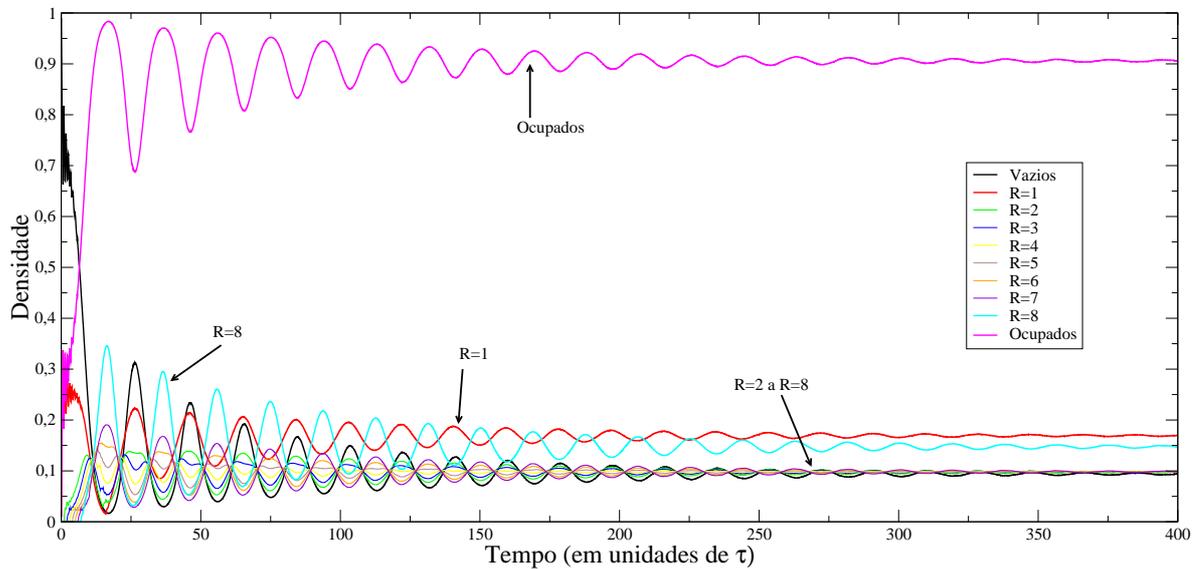


Figura 3.10: Evolução da densidade de sítios em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 70$, $T_{vida} = 10\tau$.

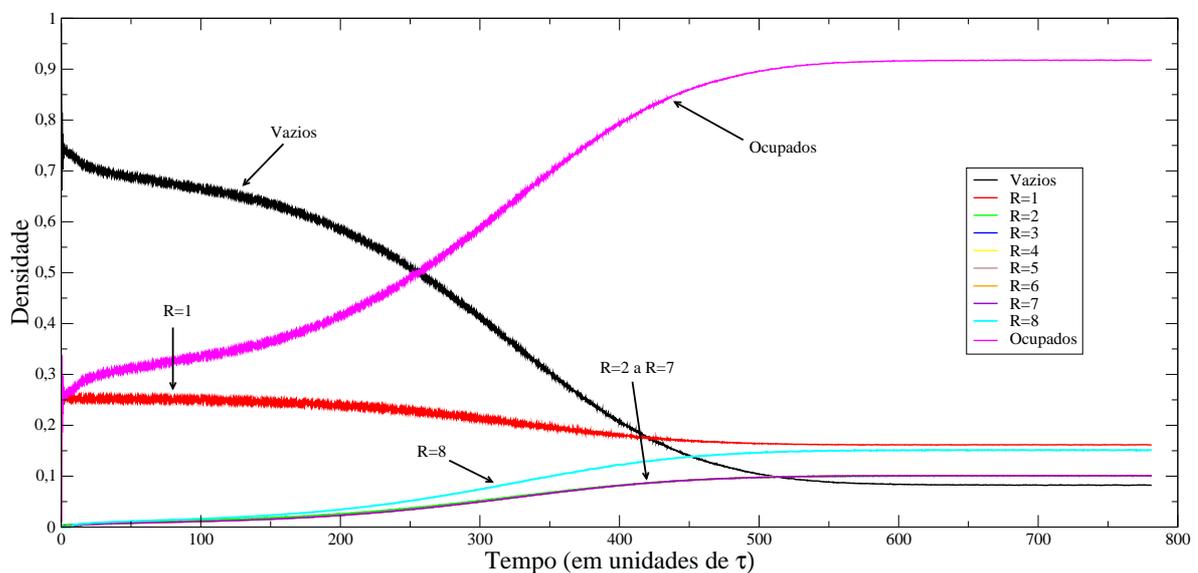


Figura 3.11: Evolução da densidade de sítios em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$, $T_{vida} = 10\tau$.

Para valores de $\tau \leq 96$ o sistema evolui para o estado estacionário “Floresta Densa” antes do valor $T_{max} = 75.000$ passos MC. Para $\tau > 96$ o sistema não chega ao estado estacionário Floresta Densa no intervalo de simulação, período razoável para a adequação do modelo à realidade como discutido na seção 2.2.3. Embora o sistema não

evolua para o estado atrator de Floresta Densa no período observado, simulações foram realizadas para $T_{max} = 150.000$ com o $\tau = 97$ e a evolução temporal é observada pelo gráfico da figura 3.12, onde o sistema alcança o estado de Floresta Densa.

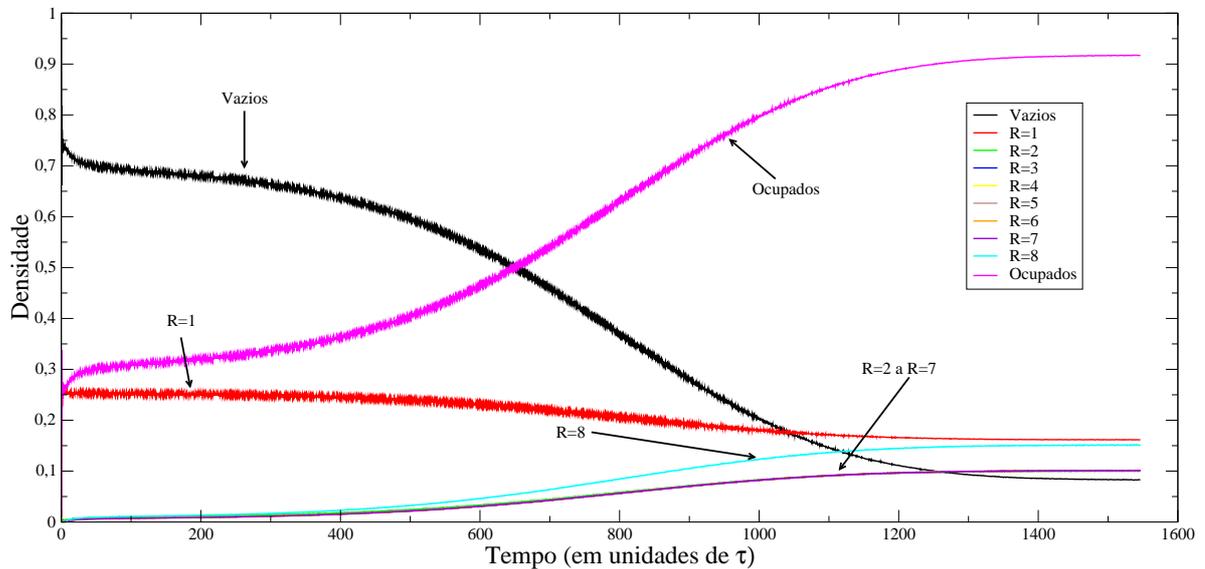
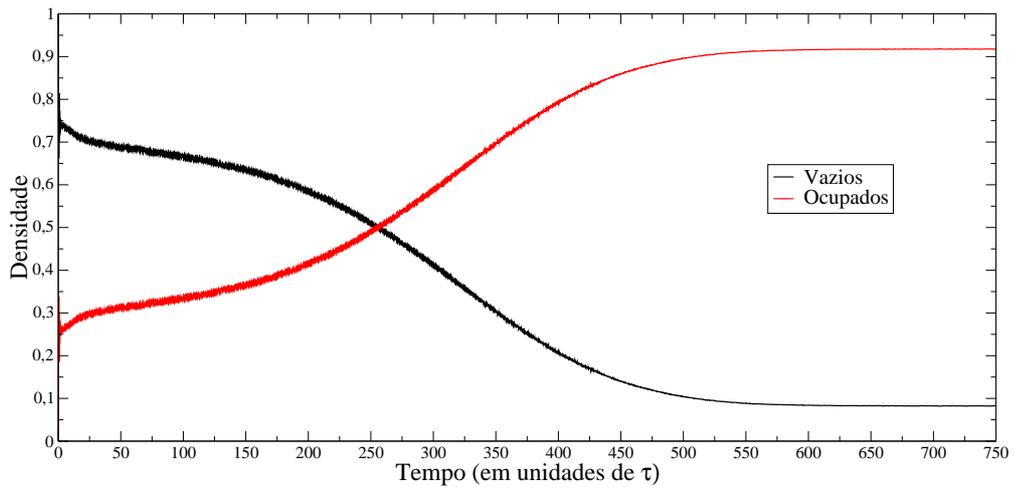
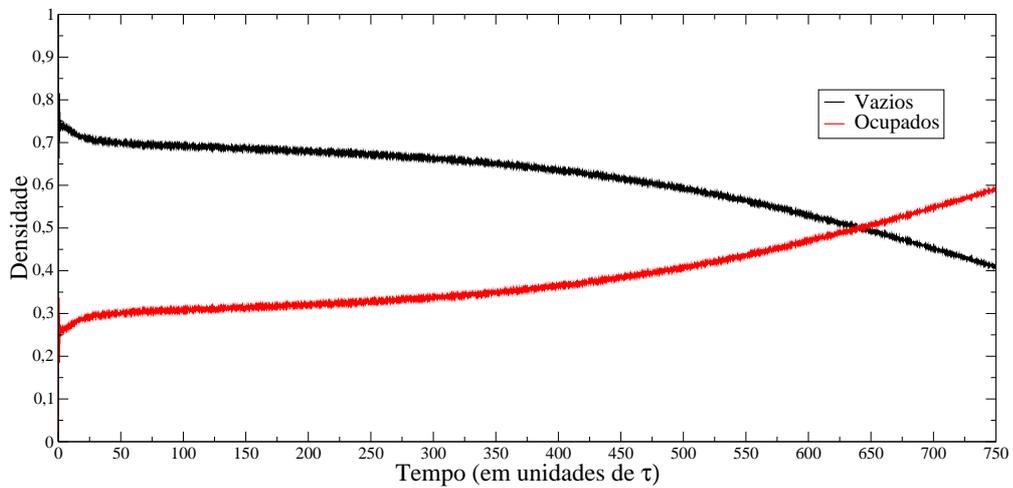


Figura 3.12: Evolução da densidade de sítios até $T_{max} = 150.000$ em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 97$, $T_{vida} = 10\tau$.

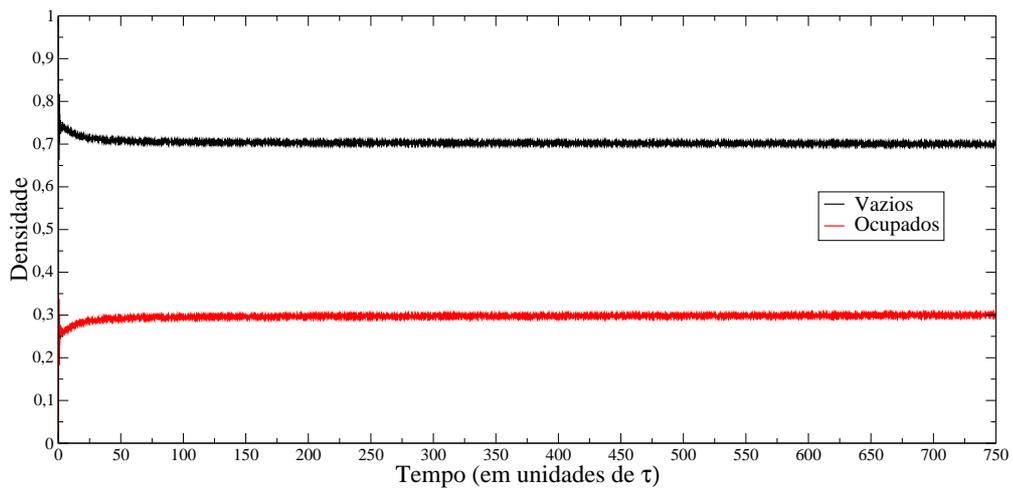
Os gráficos 3.13(a), 3.13(b) e 3.13(c) ilustram a evolução temporal apenas para as densidades de sítios ocupados por árvores e de sítios vazios sem distinguir as classes de graus de resistência. Claramente, observa-se os diferentes comportamentos no estado estacionário, sugerindo uma transição de fase para floresta do tipo Savana, no caso onde $\tau = 98$. Para o caso $\tau = 97$, o sistema evolui para o mesmo comportamento obtido com $\tau = 96$, como mostrado na figura 3.12 se a escala de tempo for aumentada. O estado estacionário caracterizado como “estado de Savana” (S) apresenta uma densidade de sítios ocupados de aproximadamente 30%, mostrando uma baixa densidade de árvores como numa savana. É importante salientar que esse valor está abaixo do limiar de percolação desse modelo, estimado da ordem de 40%[50].



(a)



(b)



(c)

Figura 3.13: Evolução da densidade de sítios em uma rede com $L = 5.000$ para: (a) $\tau = 96$, (b) $\tau = 97$ e (c) $\tau = 98$. Outros parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $T_{vida} = 10\tau$.

O gráfico apresentado na figura 3.14 mostra as densidades no estado estacionário para os diferentes valores de τ , após um tempo decorrido $T_{max} = 75.000$ passos MC. Observa-se claramente que ocorre uma transição entre os estados FD e S entre os valores de $\tau = 96$ e $\tau = 98$. As simulações foram realizadas também para um $T_{max} = 150.000$ passos MC, figura 3.15, mostrando nesse caso que a transição ocorre entre $\tau = 97$ e $\tau = 98$, onde o sistema apresenta um estado de Floresta Densa para $\tau = 97$ e um estado Savana para $\tau = 98$. O comportamento para $\tau = 97$ (figura 3.12) se assemelha ao mostrado para $\tau = 96$ (figura 3.11) quando $T_{max} = 150.000$. Para ambos os casos, mostrados nas figuras 3.15 e 3.16, a composição da floresta no estado Savana é predominantemente formado por árvores com grau de resistência $R = 1$, podendo serem árvores muito jovens ou muito velhas. Essa questão será abordada mais adiante no estudo dos respectivos histogramas de classes de graus de resistência e/ou idades.

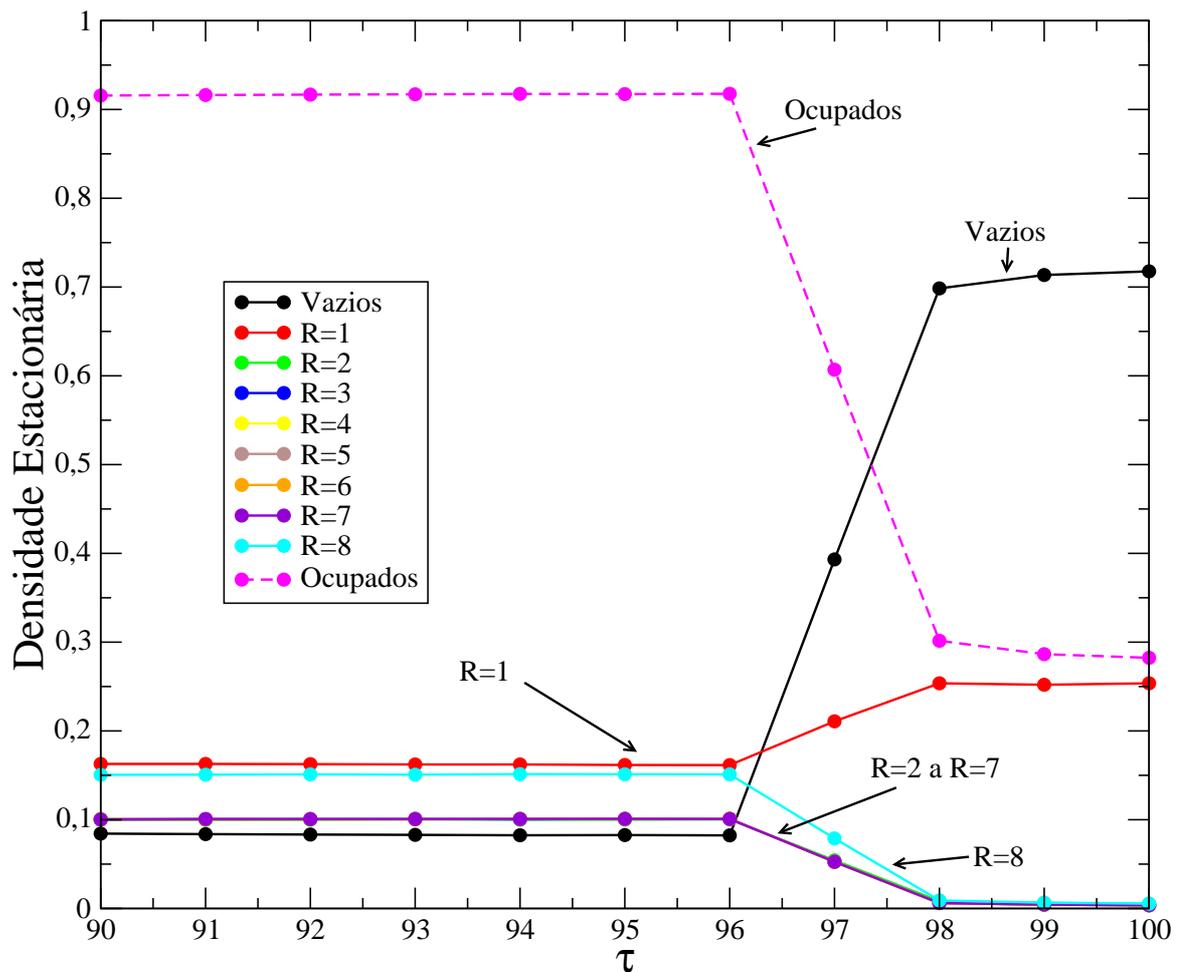


Figura 3.14: Densidades de sítios no estado estacionário (após $T_{max} = 75.000$ passos MC) em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$ e $T_{vida} = 10\tau$.

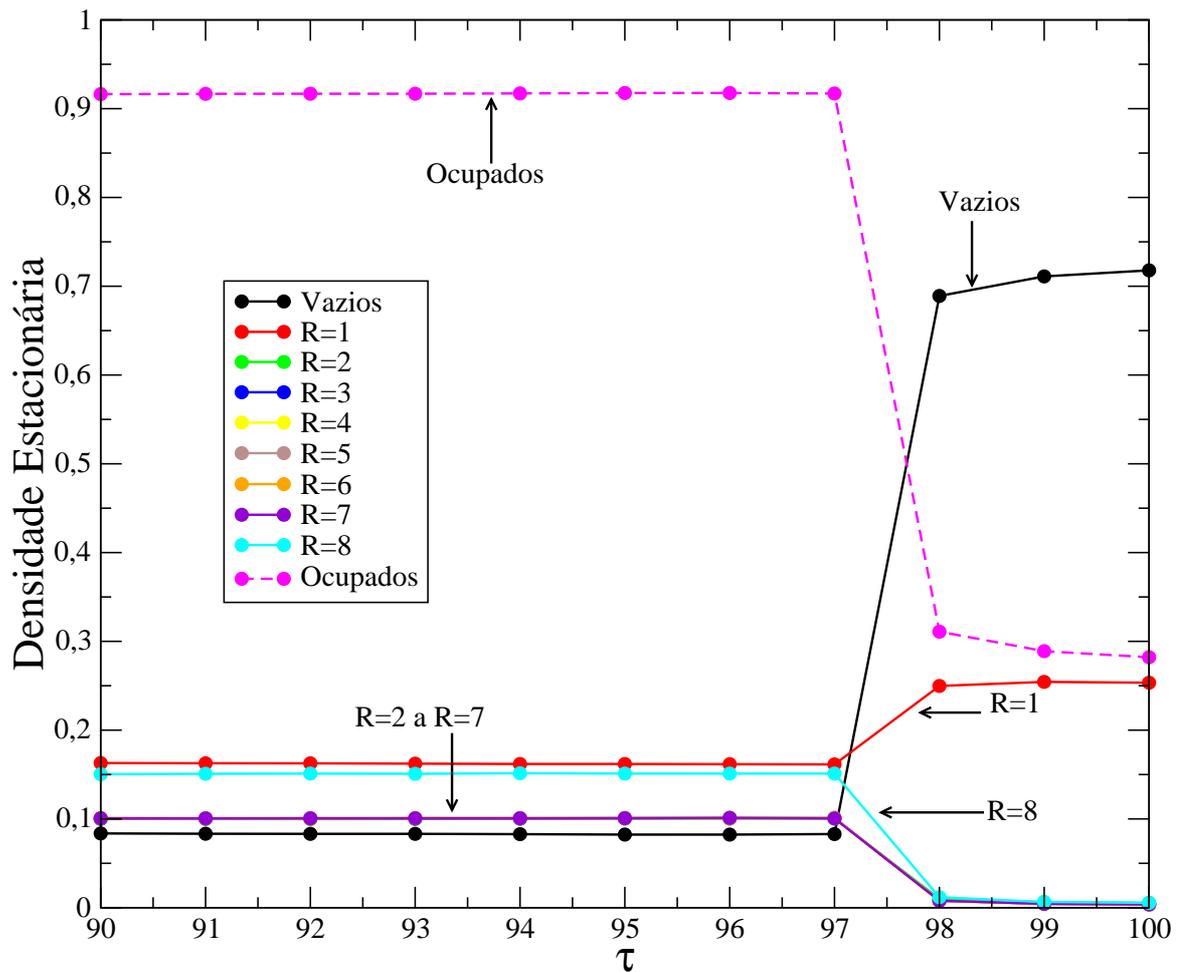


Figura 3.15: Densidades de sítios no estado estacionário (após $T_{max} = 150.000$ passos MC) em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$ e $T_{vida} = 10\tau$.

O gráfico da figura 3.16 mostra a evolução dos sítios ocupados para $T_{max} = 150.000$, onde observa-se os dois estados estacionários do sistema, quando a densidade de sítios ocupados é de aproximadamente 30% (Savana) e quando a densidade de sítios ocupados é de aproximadamente 90% (Floresta Densa). Nesse gráfico observa-se o caso para $\tau = 97$ evoluindo de um estado para outro (de FD para S) dentro da escala de tempo. Para valores abaixo de $\tau = 97$ a mesma transição ocorre, porém em escalas de tempo menores. Essa evolução ocorre mais lentamente à medida que o valor de τ aumenta. A questão se esse comportamento ocorrerá para outros valores de τ , em qualquer escala de tempo, é ainda uma questão em aberto, a qual demanda estudos mais aprofundados que levem em conta o tamanho finito da rede usado nas simulações.

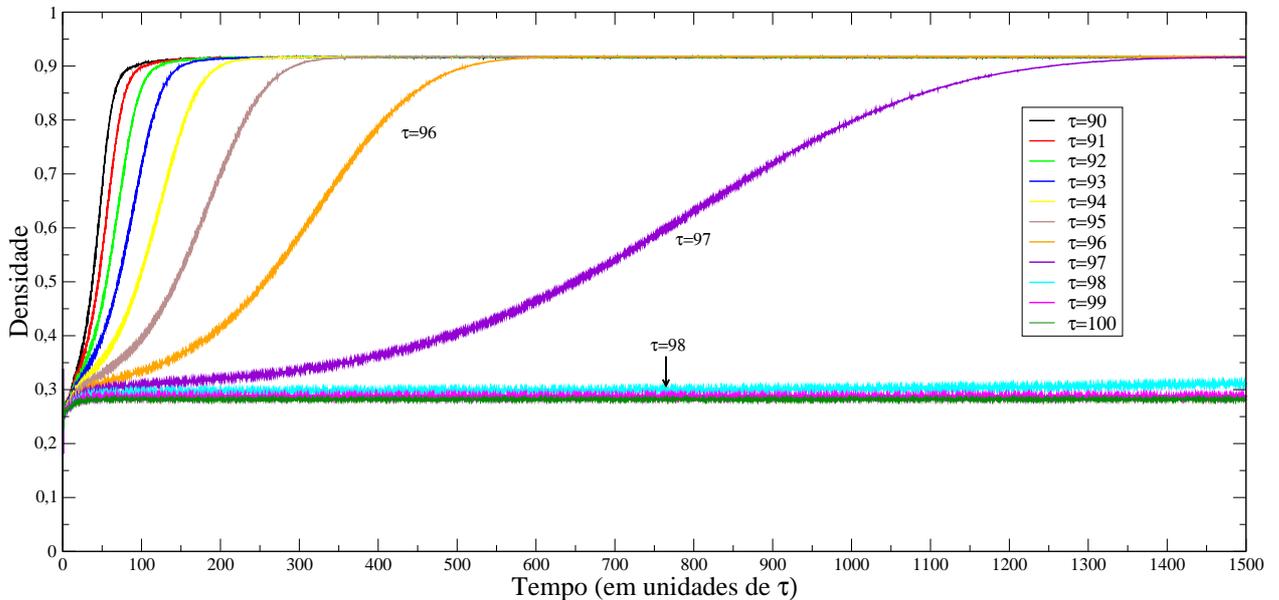


Figura 3.16: Densidade de sítios até $T_{max} = 150.000$ passos MC. Parâmetros: $L = 5.000$, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $T_{vida} = 10\tau$.

A figura 3.17 apresenta um esboço do diagrama de fases para os dois estados estacionários, Floresta Densa e Savana, nas escalas de tempo usadas nas simulações deste trabalho. Nesse diagrama, observa-se claramente a separação entre duas regiões, uma marcada por círculos azuis, indicando a fase de Floresta Densa (FD) e outra marcada por círculos pretos abertos indicando a fase Savana (S). Na fronteira entre essas duas regiões há pontos (círculos vermelhos) que indicam que a configuração da floresta está com o valor da densidade intermediário entre os estados FD e S. Essa fronteira, onde os estados do sistema estão em transição de FD para S, está representada por símbolos vermelhos, no gráfico.

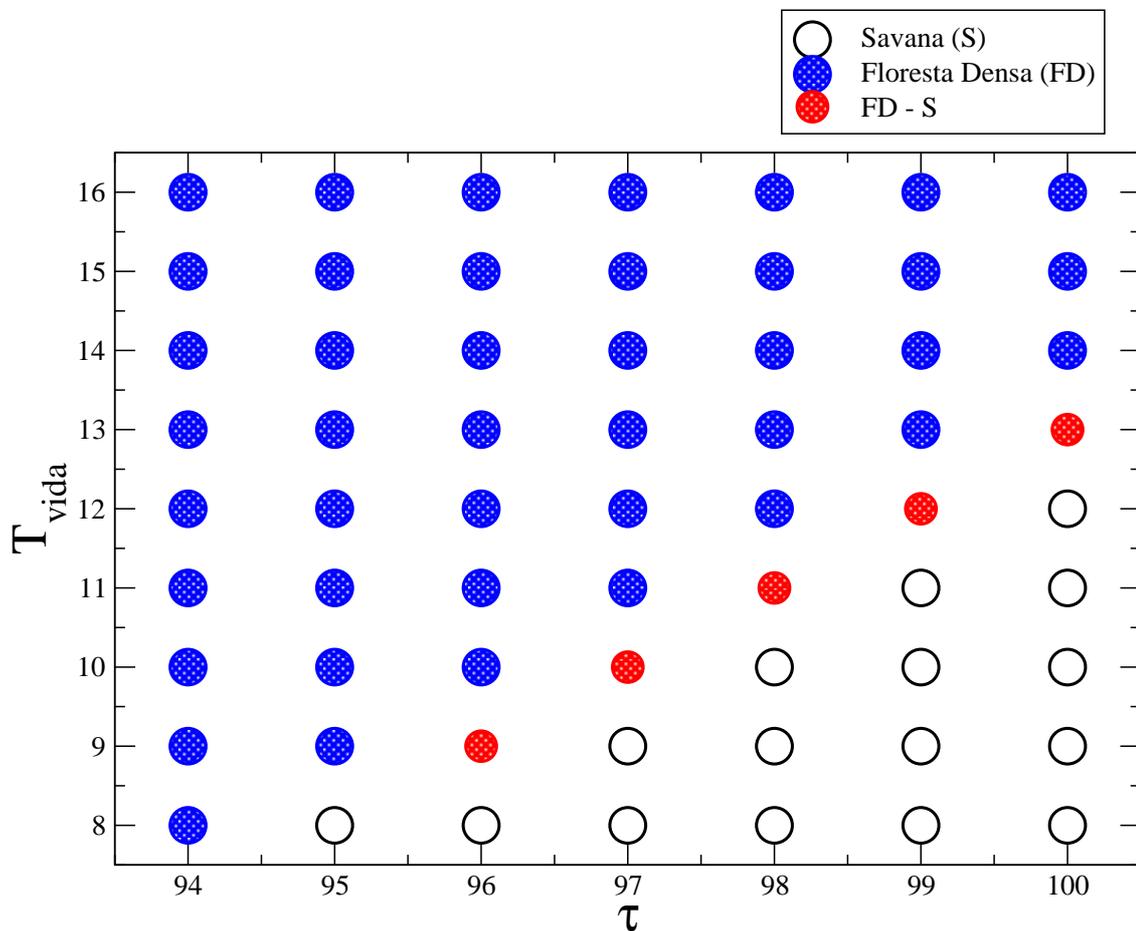


Figura 3.17: Diagrama de fases para Floresta Densa e Savana em $T_{max} = 75.000$ passos MC.

3.2 Histogramas de faixas etárias

Foram construídos histogramas de frequências para faixas etárias das árvores considerando o modelo com decaimento do grau de resistência na senescência e a idade das árvores expressa em anos, considerando o tamanho do passo MC discutido previamente na seção 2.2.3.

O histograma mostrado na figura 3.18 apresenta a distribuição de árvores para cada classe de idades, com o parâmetro $\tau = 96$. Observa-se um grande número de árvores jovens seguido de um “quase patamar” de árvores com idade madura, onde ocorre um decréscimo pequeno a cada mudança de classe. Posteriormente, ocorre um rápido decaimento no número de árvores no período de senescência causado por incêndios, comportamento observado em histogramas reais como mostrado na figura 1.7 no primeiro capítulo desta dissertação.

A figura 3.19 apresenta o histograma para o valor de $\tau = 97$, quando a transição de Floresta Densa para Savana está ocorrendo. Nesse caso, observa-se um aumento substancial em uma ordem de grandeza no número de árvores jovens e uma diminuição no número de árvores na meia idade e senescência, porém o perfil qualitativo do histograma continua o mesmo que o apresentado quando $\tau = 96$, na fase de Floresta Densa. Para $\tau = 98$ (figura 3.20) observa-se um número ainda maior (\sim duplicado) de árvores jovens e, por decorrência, poucas árvores de meia idade e na senescência, característico de um cenário de uma floresta do tipo Savana, como ilustrado na figura 1.1(b) do capítulo 1. Nesse histograma, observa-se que o número de sítios preenchidos com árvores jovens alcança pouco mais de 90% dos sítios da rede, sendo $\sim 2,3 \times 10^7$ sítios para uma rede com $L \times L = 2,5 \times 10^7$ sítios.

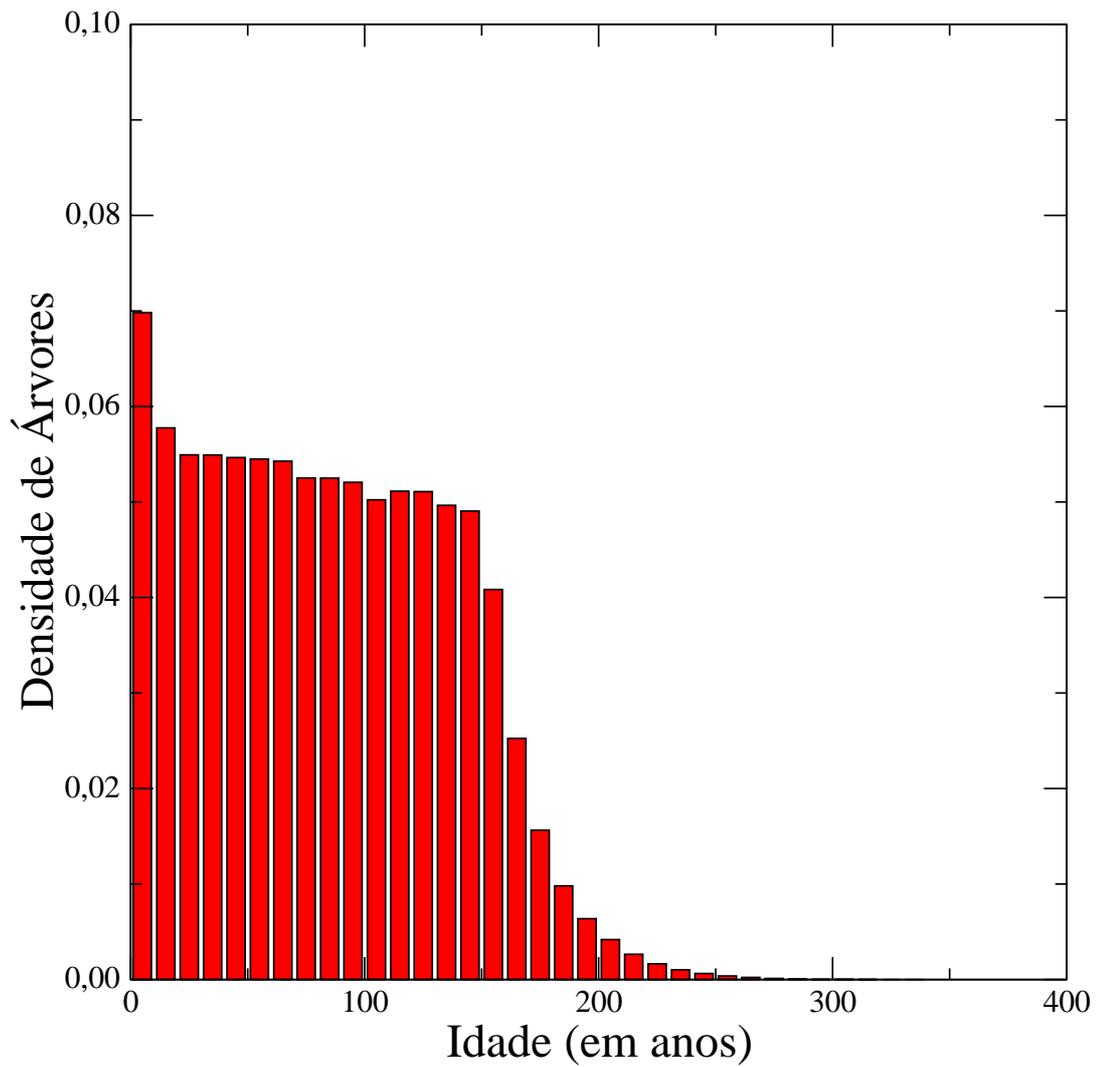


Figura 3.18: Histograma de Idades após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 1.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$, $T_{vida} = 10\tau$.

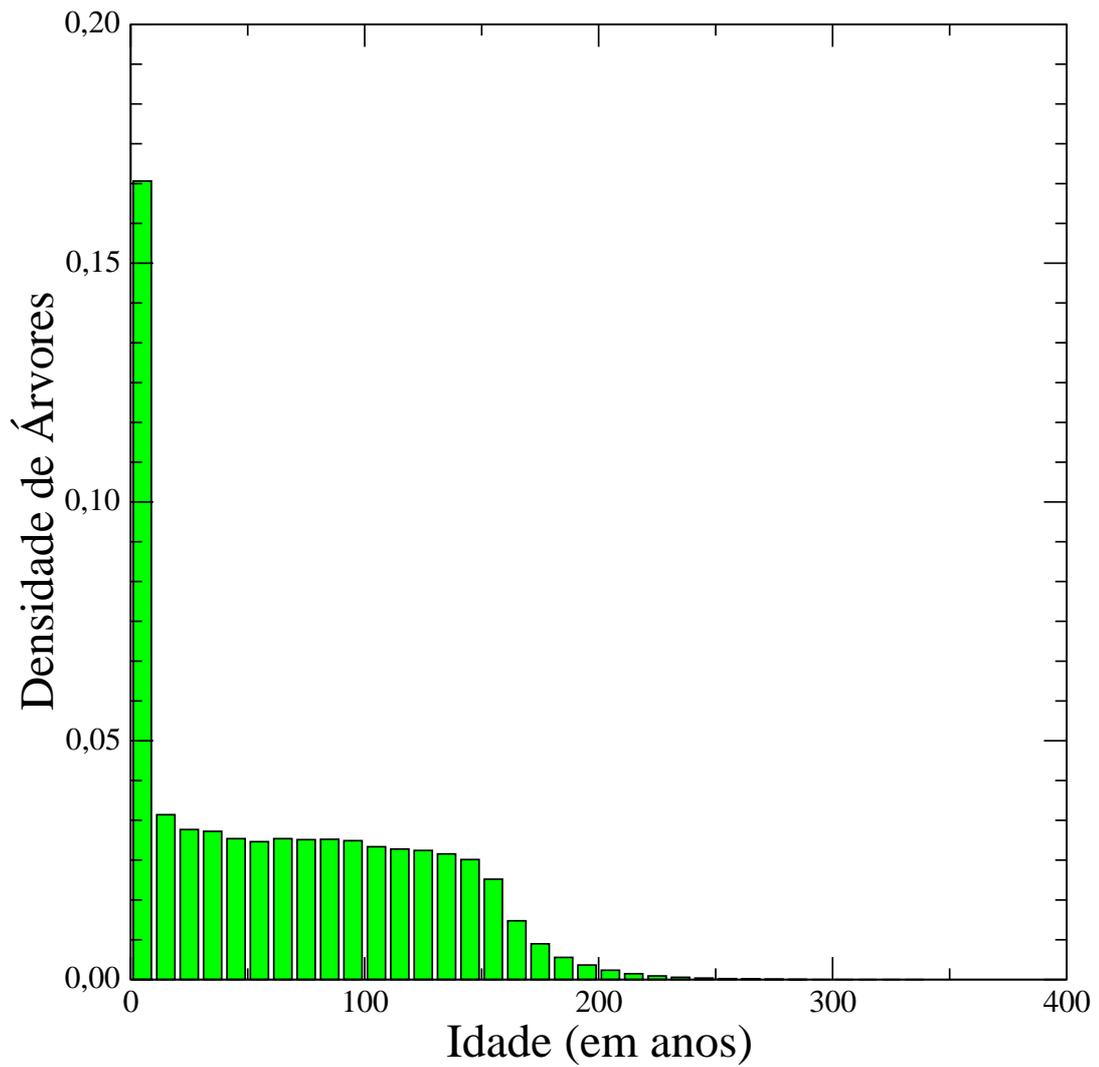


Figura 3.19: Histograma de Idades após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 1.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 97$, $T_{vida} = 10\tau$.

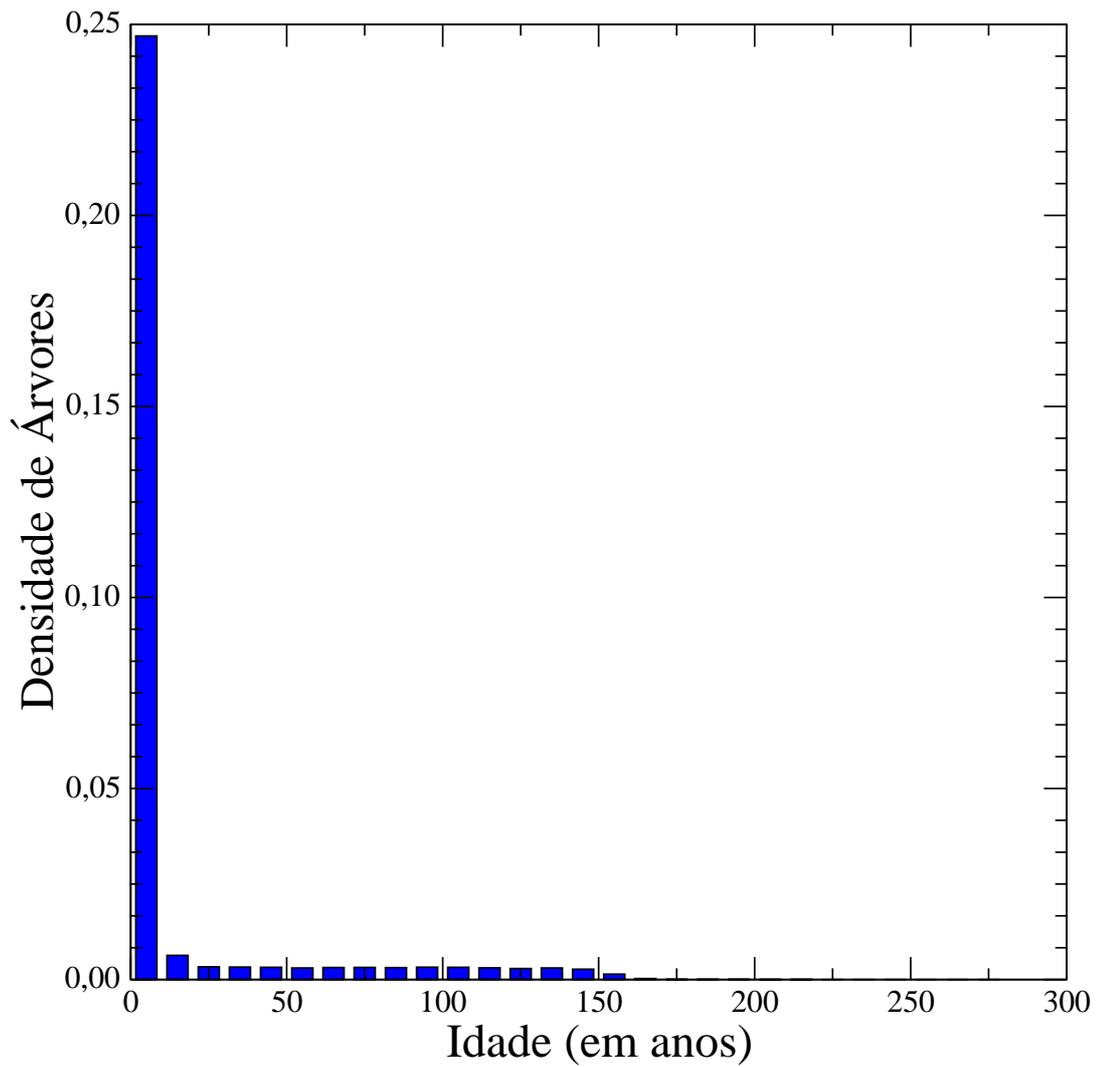


Figura 3.20: Histograma de Idades após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 1.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 98$, $T_{vida} = 10\tau$.

A figura 3.21 apresenta os 3 histogramas juntos, na mesma escala, para comparação no número de árvores jovens na meia idade e na senescência. Observa-se que, para $\tau = 96$ a floresta tem uma grande diversidade de árvores com relação às idades, mas para $\tau = 98$ essa diversidade não é evidenciada. Para $\tau = 97$ essa diversidade é relativamente menor que para $\tau = 96$, mas ainda grande quando comparada ao caso $\tau = 98$, sugerindo que a floresta encontra-se em uma possível transição de fase dinâmica da fase Floresta Densa para a fase de Savana.

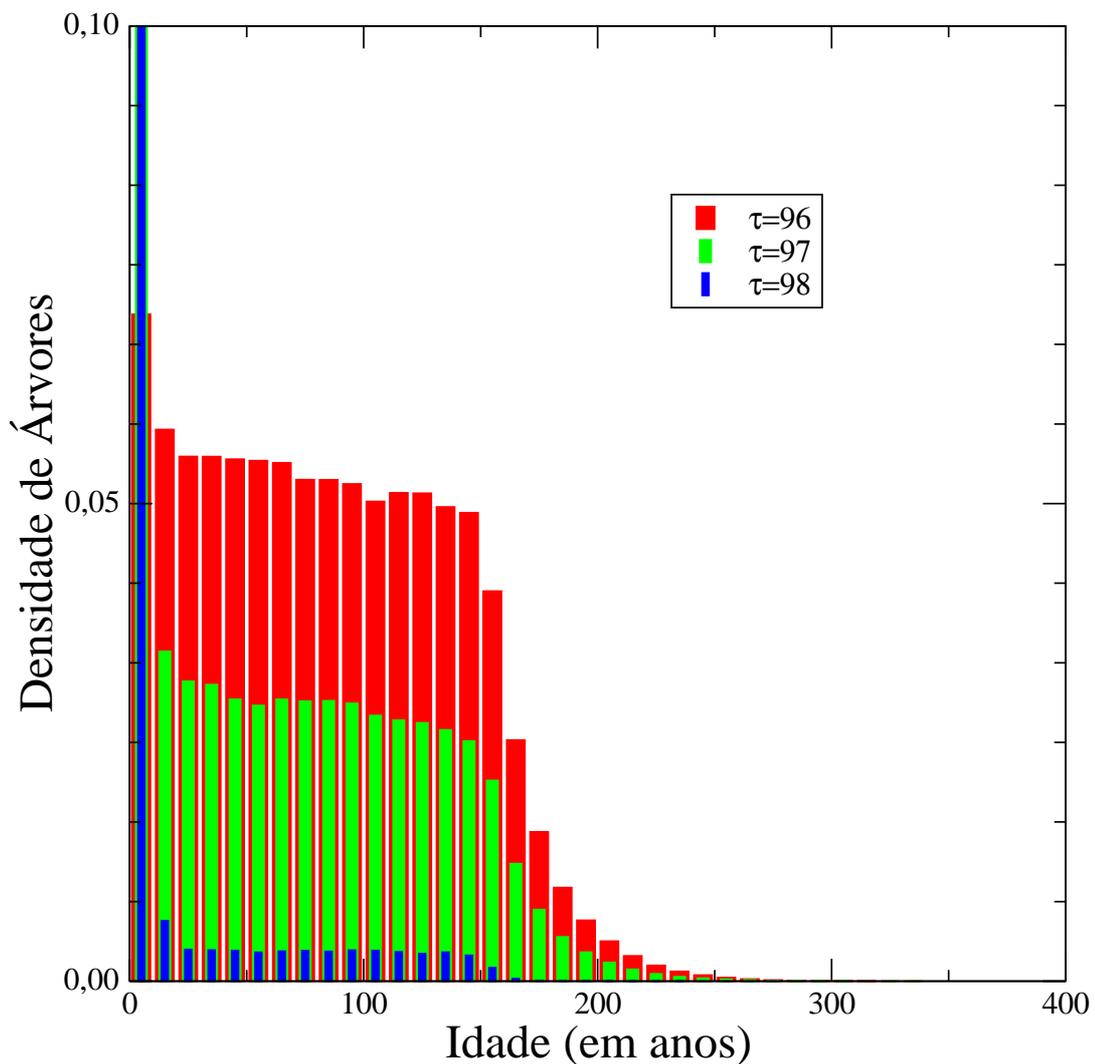


Figura 3.21: Histograma de Idades após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 1.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $T_{vida} = 10\tau$.

A figura 3.22 apresenta o histograma de frequências para classes de idades para $\tau = 96$ com variações no valor de T_{vida} . Observa-se que para $T_{vida} = 8\tau$ há uma enorme quantidade de árvores predominantemente jovens, evidenciando que a floresta está na

fase de Savana. Quando o valor de T_{vida} é aumentado acima de 8τ o perfil do histograma indica que a fase é de Floresta Densa, com pequenas diferenças no tamanho do “quase patamar” de árvores na meia idade, mas aumentando as populações de árvores nas classes com maiores idades. Isso ocorre porque as árvores permanecem mais tempo com o grau de resistência máximo ($R = 8$).

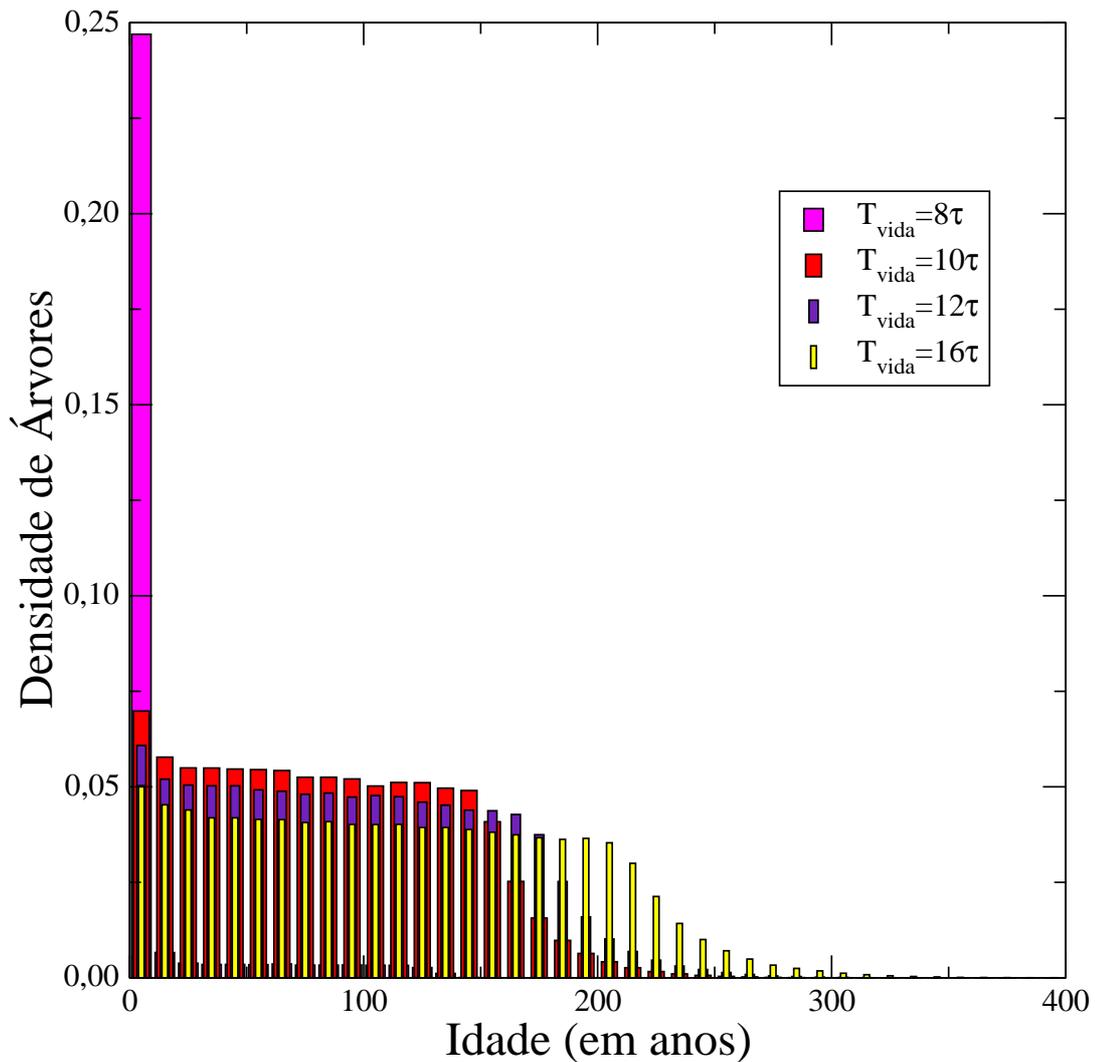


Figura 3.22: Histograma de Idades após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 1.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$.

Por outro lado, do ponto de vista dos incêndios, a distribuição do tamanho das queimadas S , em número de árvores, apresenta comportamentos distintos em cada fase. Uma distribuição de tamanho dos incêndios para diferentes valores de τ , próximos à possível transição, está apresentada em um gráfico log-log na figura 3.23. A contagem dos incêndios ocorreu para $T_{max} = 50.000$ passos MC, fazendo com que o caso para $\tau = 97$ correspondesse à floresta densa. Para valores menores que $\tau = 97$ a floresta se encontra na fase de floresta densa, onde os tamanhos dos incêndios são menores devido à presença de grande número de árvores resistentes. Para os valores $\tau = 97$ e $\tau = 98$ a floresta se encontra na fase Savana e com menos árvores resistentes e predominância de árvores jovens, portanto com incêndios se propagando por uma quantidade maior de árvores em um mesmo *cluster*.

Os dois estados atratores do sistema apresentam comportamentos diferentes quanto a função de distribuição do tamanho de incêndios. O estado Savana (S) apresenta um comportamento de lei de potência com presença de muitas árvores com resistência mínima, permitindo a propagação de incêndios em todas as escalas de tamanho, em particular de grandes incêndios. Esse comportamento se assemelha ao caso onde $R < 3$ encontrado no modelo com resistência fixa[34]. Nesse estado, o sistema apresenta criticalidade auto-organizada, como observada no modelo DS. No entanto, o estado atrator Floresta Densa (FD) apresenta uma função de distribuição que indica a presença de um expressivo número de árvores resistentes que evita a propagação de grandes incêndios pela floresta. Em decorrência, essa função não apresenta um comportamento de lei de potência, exibindo um decaimento exponencial para grandes incêndios.

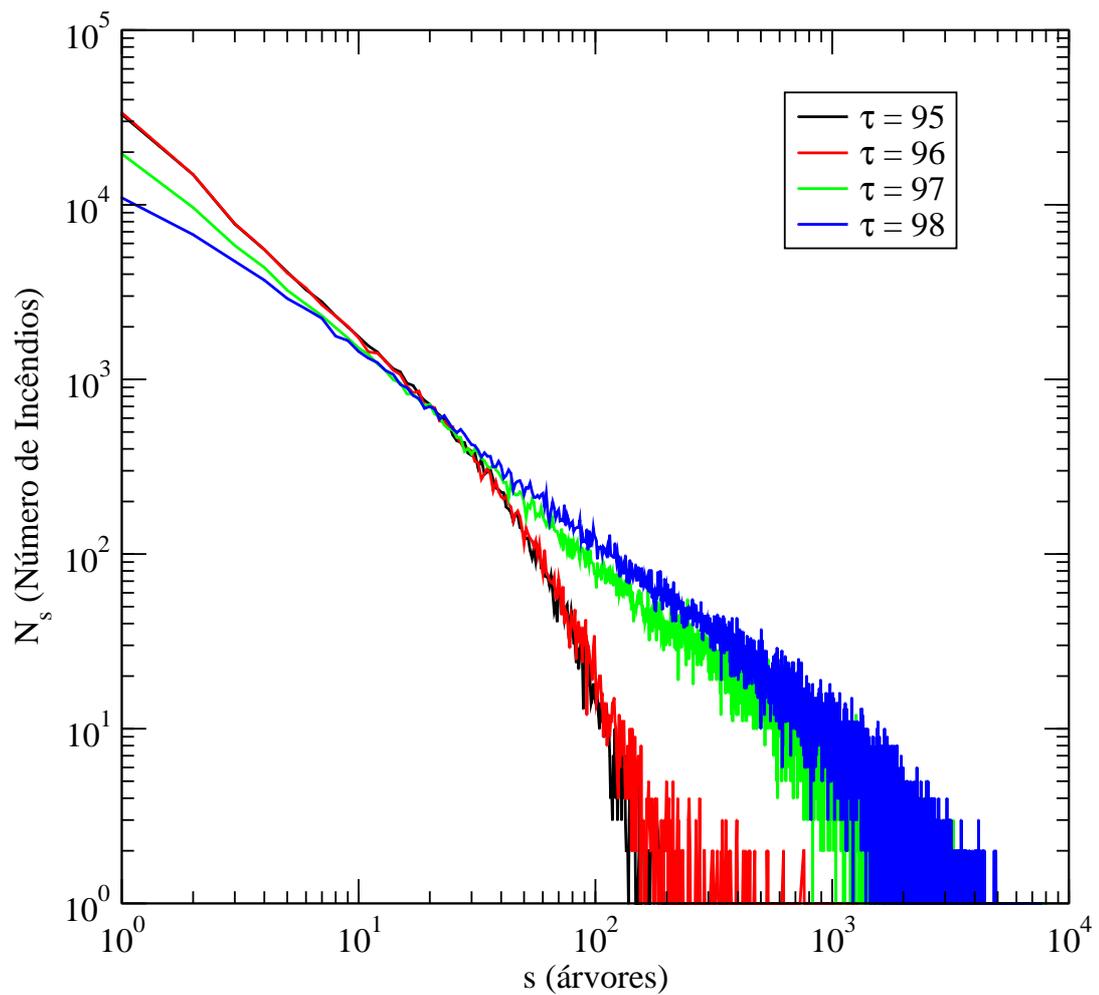


Figura 3.23: Distribuição de Tamanhos de Incêndios após $T_{max} = 50.000$ passos MC em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $T_{vida} = 10\tau$.

Para os valores de τ entre 96 e 98 foram construídos gráficos mostrando a correlação entre os graus de resistência e as idades das árvores. A figura 3.24 apresenta essas correlações. No gráfico 3.24(a) observa-se a correlação para $\tau = 96$, onde as árvores alcançam idades mais velhas chegando à senescência. Para $\tau = 97$, no gráfico 3.24(b), há uma diminuição no número de árvores que chegaram à senescência em relação ao caso para $\tau = 96$. Observa-se esse número de árvores na senescência diminuir mais ainda quando $\tau = 98$, caso mostrado no gráfico 3.24(c), onde a predominância é de as árvores mais jovens.

Para ilustrar visualmente as características da distribuição de árvores em cada fase, apresentamos alguns flagrantes da parte central da rede em determinados momentos da simulação. Após $T_{max} = 75.000$ passos MC o sistema pode apresentar diferentes fases de florestas. Nas figuras 3.25, 3.26 e 3.27 observam-se flagrantes da rede exibindo sua parte central, de tamanho 100×100 , decorridos 75.000 passos MC. Os quadrados em verde ilustram sítios ocupados com árvores enquanto espaços brancos significam sítios vazios. Para $\tau = 96$ a floresta apresenta-se bastante densa com presença de espaços vazios agrupados e aleatoriamente espalhados pela rede, formando pequenas clareiras, situação apresentada na figura 3.25. Para $\tau = 97$, caso apresentado na figura 3.26, a floresta ainda é densa mas com presença de grandes vazios, mas apresentando uma densidade de árvores possivelmente acima do limiar de percolação. Para $\tau = 98$, caso apresentado na figura 3.27, a floresta apresenta-se com poucas árvores agrupadas em pequenos bosques distribuídos aleatoriamente, cenário mais próximo de uma savana.

As figuras 3.28, 3.29 e 3.30 apresentam flagrantes de tamanho 100×100 , da parte central da rede. Os diferentes graus de resistência nas árvores da floresta são mostrados por diferentes cores, onde cada quadrado preenchido com cor ilustra uma árvore. Quando $\tau = 96$ (figura 3.28) a floresta apresenta uma diversidade de árvores de diferentes graus de resistência, situação semelhante ao caso quando $\tau = 97$ (figura 3.29) onde observa-se a presença de mais vazios. Quando $\tau = 98$ (figura 3.30) a floresta não apresenta grande diversidade de árvores com diferentes resistências, formando bosques com árvores mais resistentes e apresentando grandes vazios. Uma fase de Floresta Densa ocorre quando $\tau = 96$ e uma fase de Savana ocorre quando $\tau = 98$. A transição entre as duas fases é observada quando $\tau = 97$.

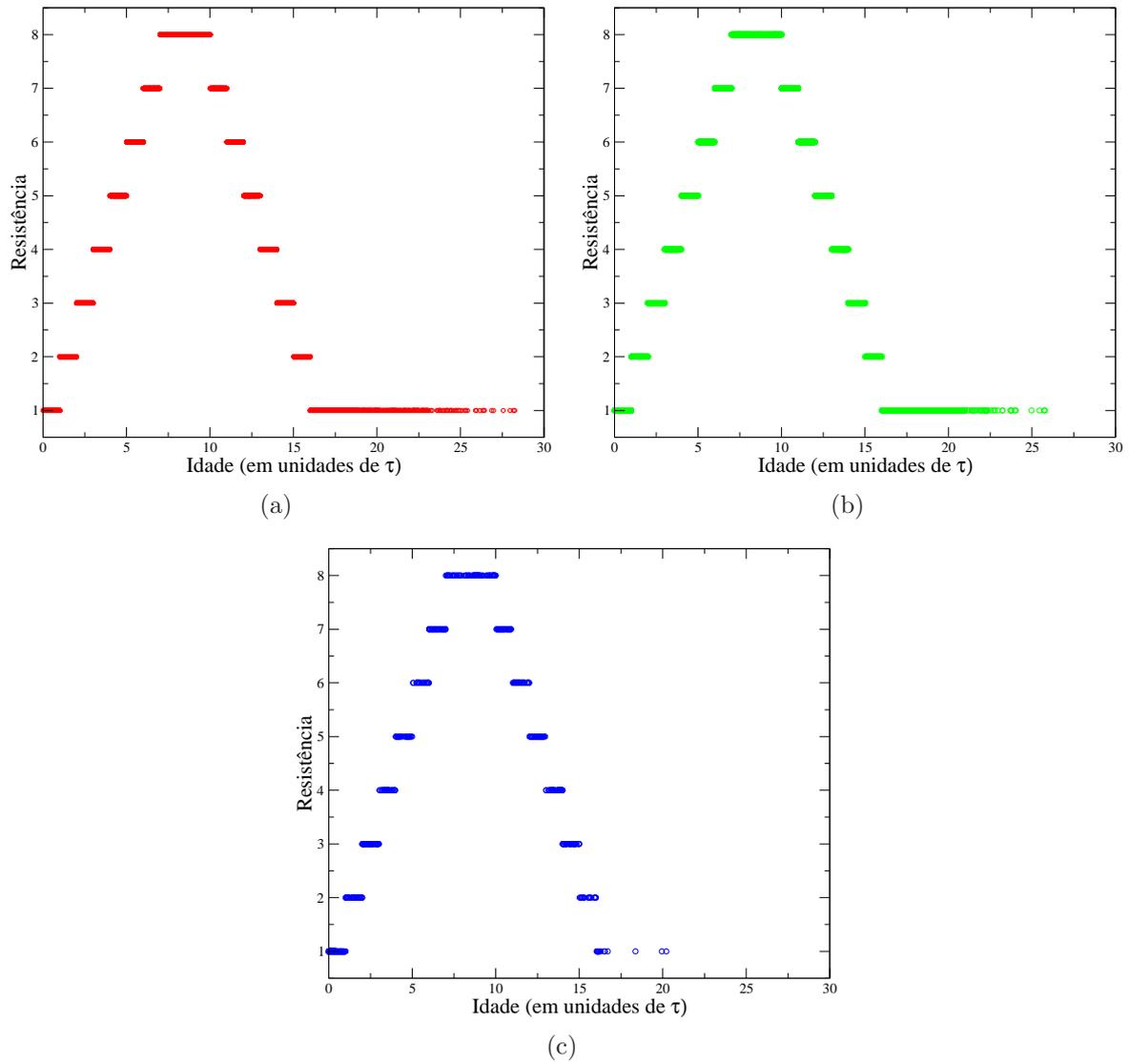


Figura 3.24: Correlação Resistência \times Idade após $T_{max} = 75.000$ passos MC em uma rede com $L = 5.000$. Parâmetros: $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $T_{vida} = 10\tau$. Em (a) $\tau = 96$; (b) $\tau = 97$; (c) $\tau = 98$.

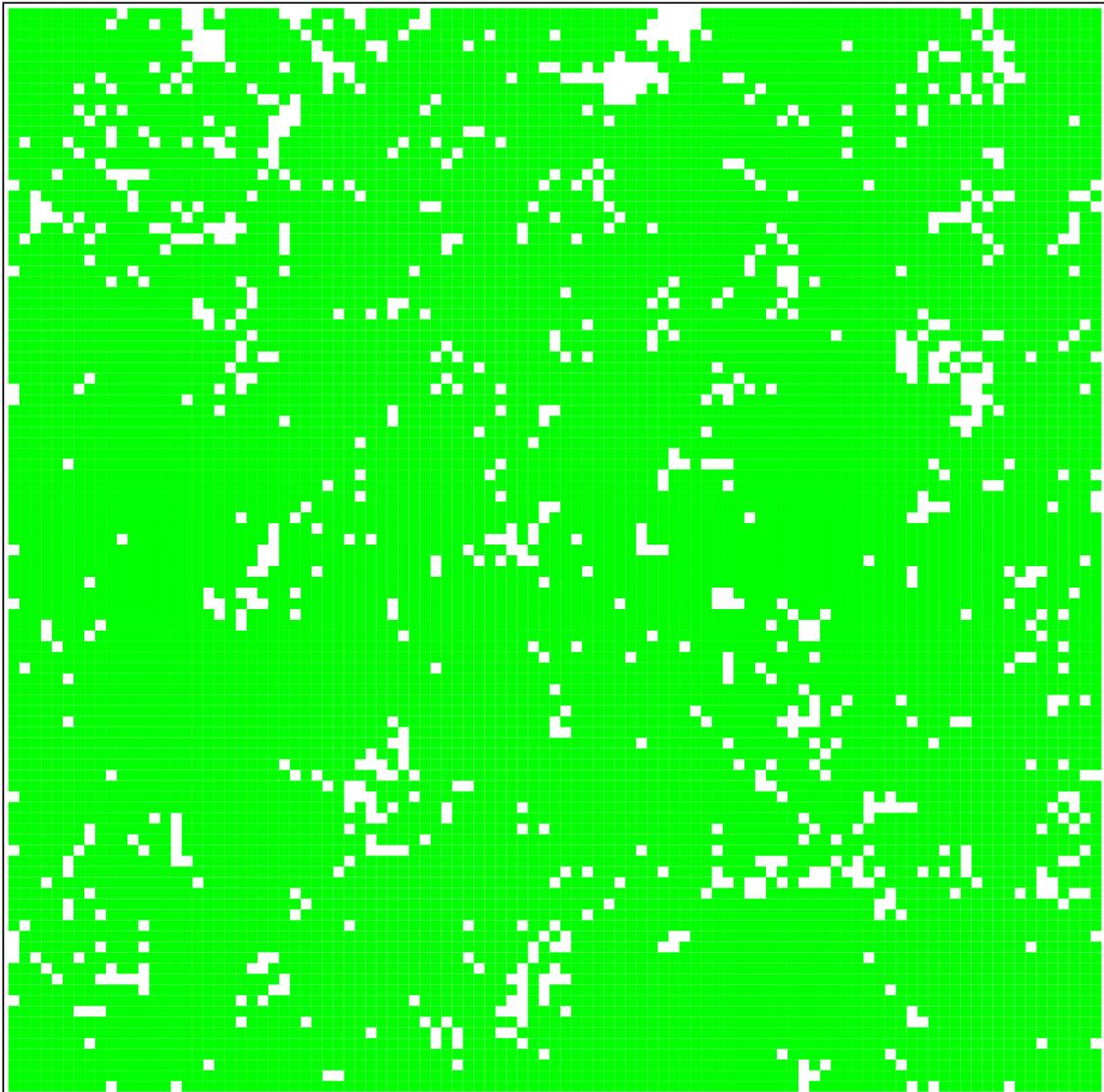


Figura 3.25: Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). Sítios em verde estão ocupados com árvores, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$.

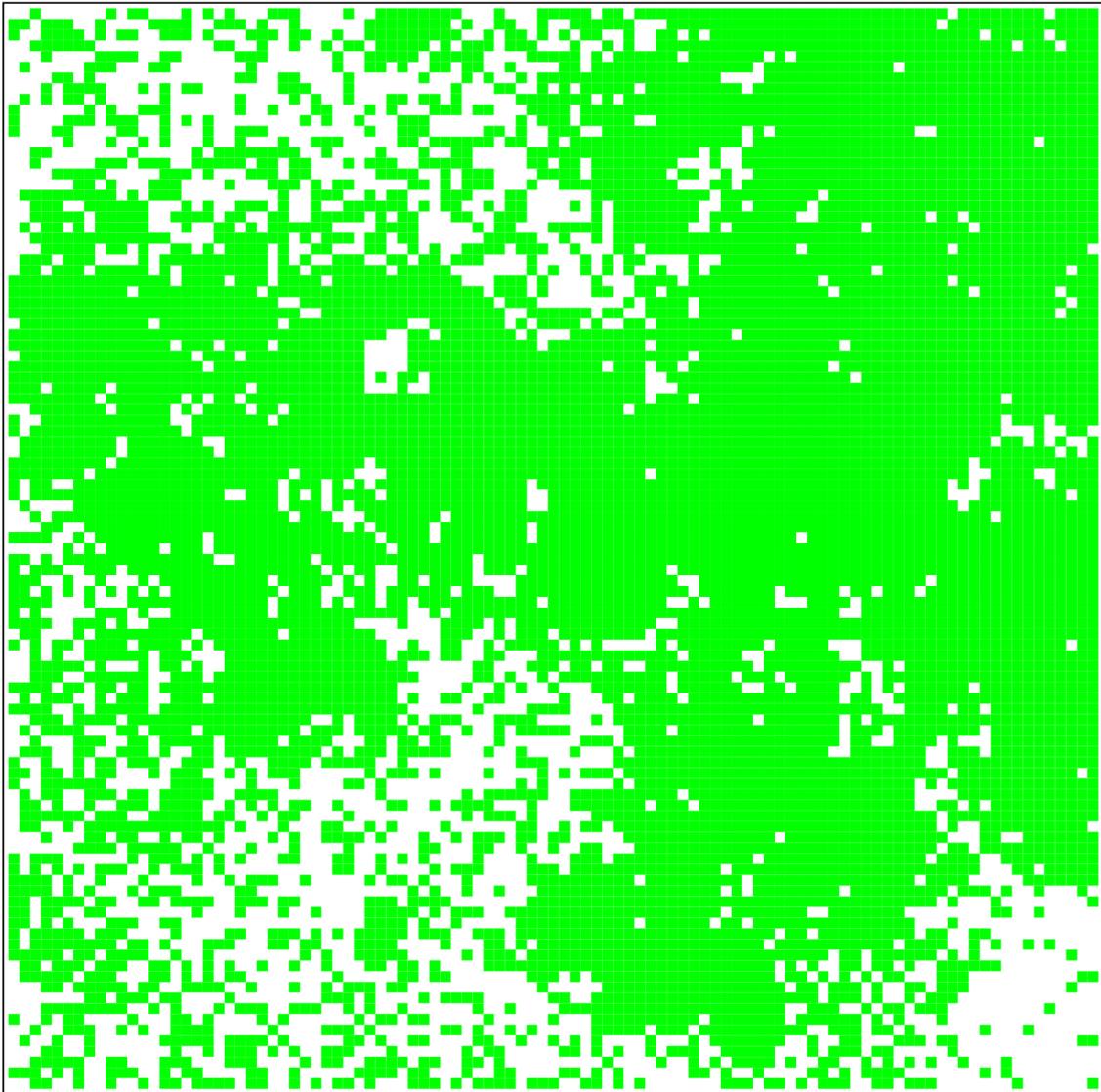


Figura 3.26: Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). Sítios em verde estão ocupados com árvores, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 97$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$.

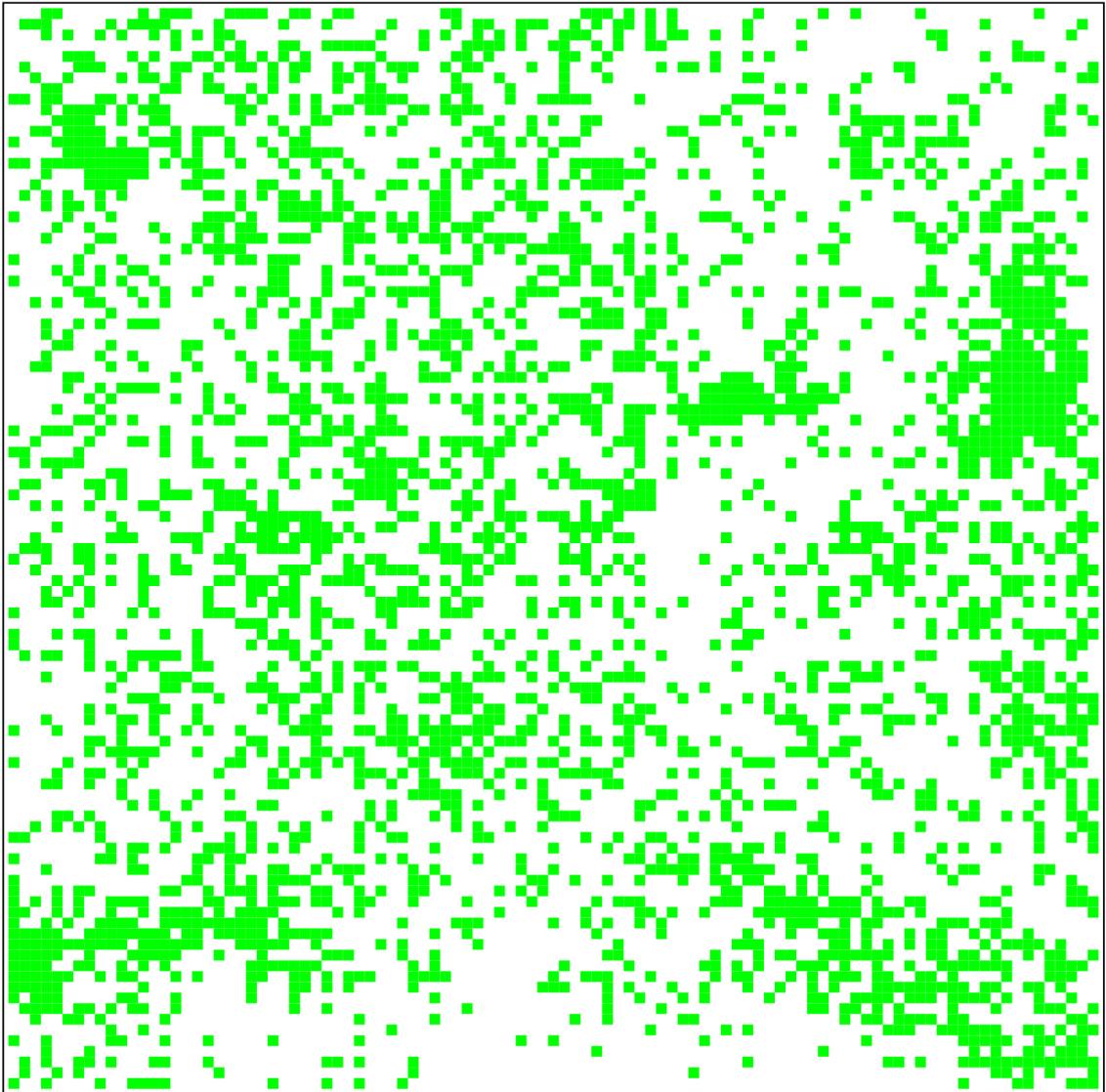


Figura 3.27: Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). Sítios em verde estão ocupados com árvores, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 98$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$.

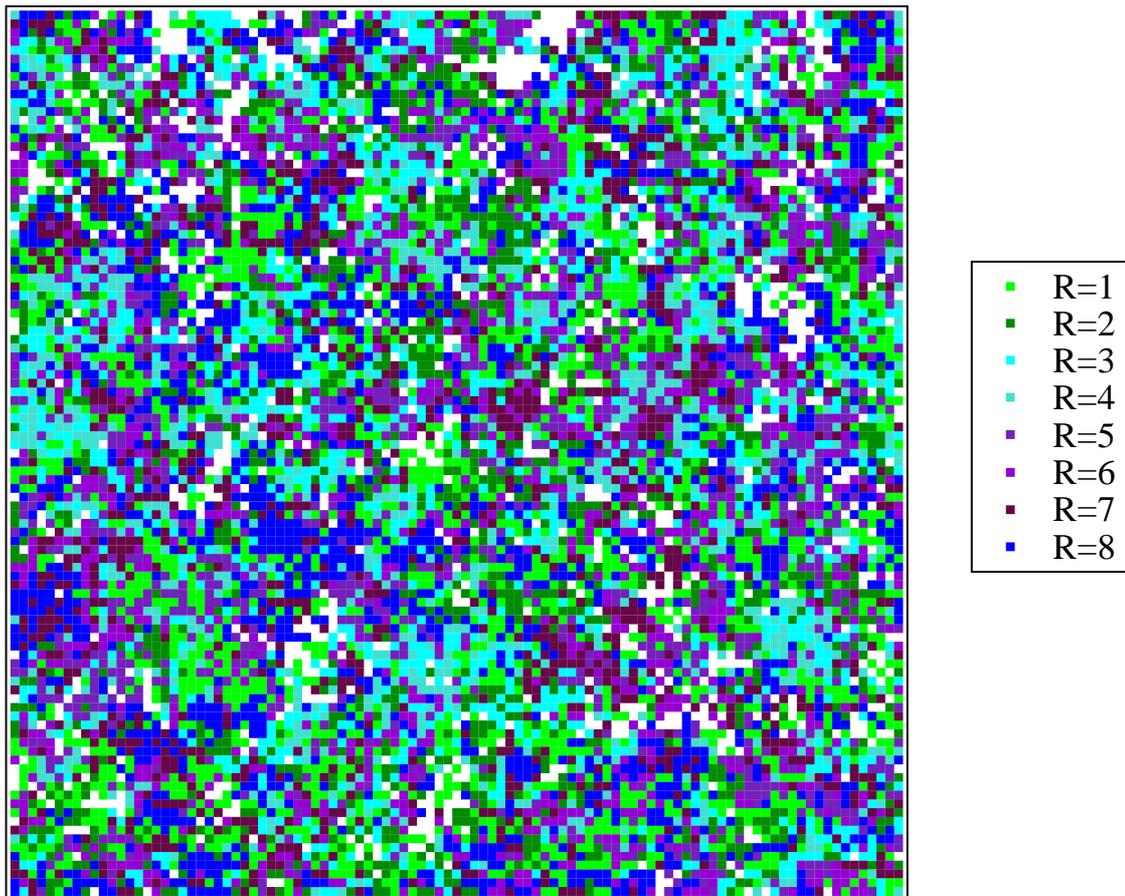


Figura 3.28: Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). R são as resistências e estão apresentadas na legenda da figura, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 96$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$.

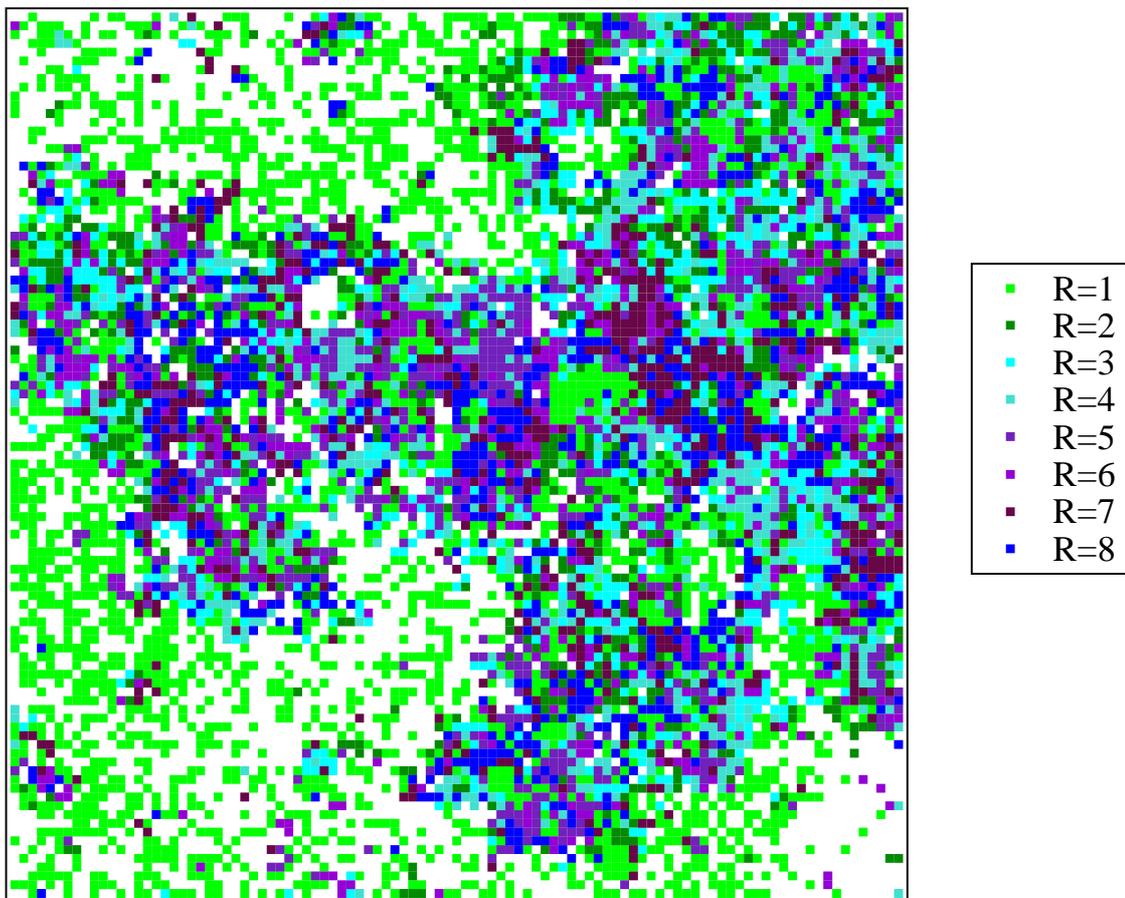


Figura 3.29: Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). R são as resistências e estão apresentadas na legenda da figura, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 97$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$.

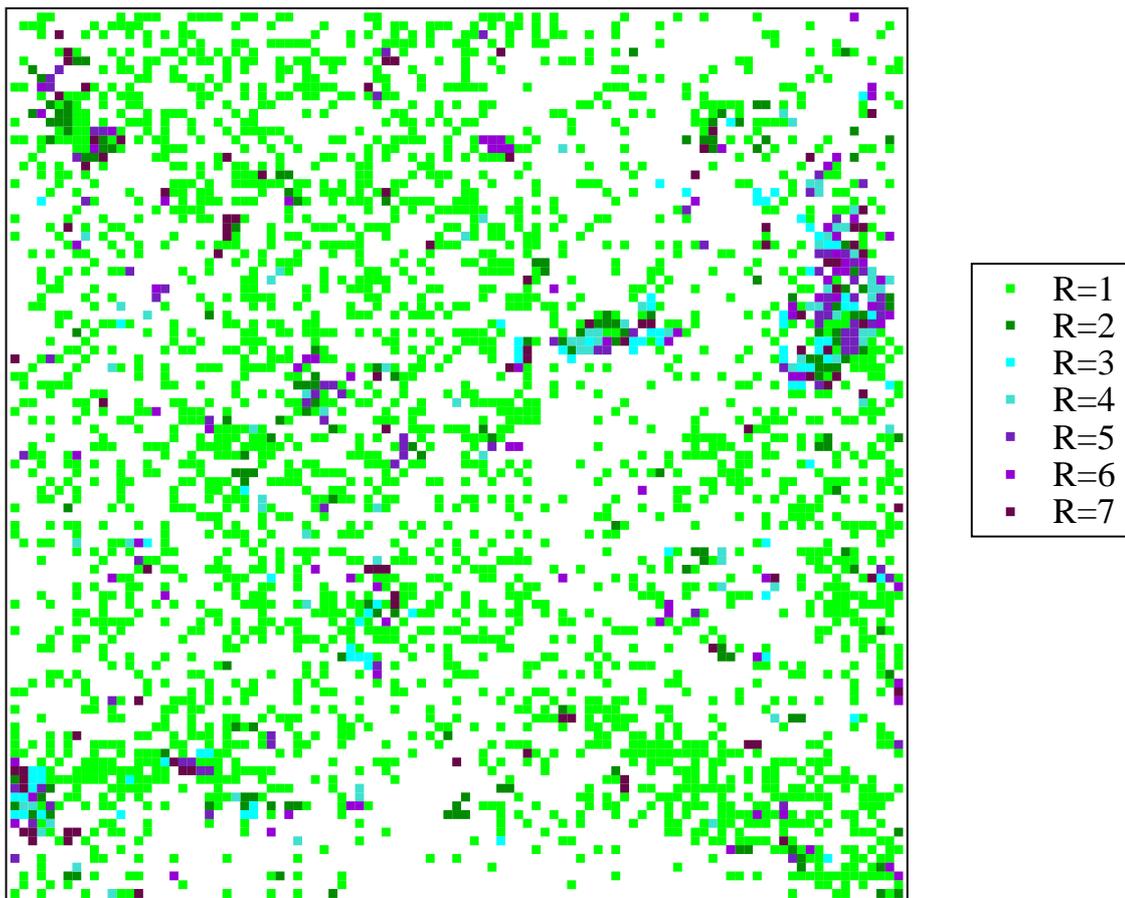


Figura 3.30: Parte central da Rede (com $L = 5.000$ originalmente). R são as resistências e estão apresentadas na legenda da figura, $p = 0,01$, $f = 0,0001$, $\tau = 98$, $T_{vida} = 10\tau$, $T_{max} = 75.000$.

Capítulo 4

Conclusões

*“A paciência é amarga,
mas seu fruto é doce.”*

[Jean-Jacques Rousseau]

Nesta dissertação foi apresentado um modelo de autômatos celulares para simulação de uma floresta composta por apenas uma espécie vegetal, na presença de incêndios florestais, com árvores cujo grau de resistência à queima está correlacionado com a idade das árvores de tal maneira que árvores muito jovens ou muito velhas são mais susceptíveis à queima, enquanto árvores em idade madura são mais resistentes, com graus de inflamabilidade variando com a idade. Foram realizadas simulações para diversos parâmetros do modelo, tais como o tempo de vida médio (T_{vida}) da espécie escolhida, a taxa de aumento do grau de resistência (τ), a taxa de regeneração espontânea da floresta e a frequência de raios provocadores de incêndios.

A evolução temporal das densidades apresenta dois possíveis estados estacionários (atratores da dinâmica), independente das condições iniciais para as configurações de árvores, os quais correspondem aos estados de *Floresta Densa* (FD) e *Savana* (S), cujas densidades de árvores são da ordem de 90% e 30%, respectivamente. As densidades de árvores portanto possuem valores bem acima do limiar de percolação para a fase de floresta densa e abaixo do limiar para a fase de savana que para este modelo de propagação na rede quadrada com vizinhança de Moore ativa é da ordem de 0,4. O modelo captura a possibilidade de uma transição dinâmica entre as fases de Floresta Densa (FD) e Savana (S), mesmo para o caso mais simples de uma floresta de uma única espécie vegetal.

Ao longo da lenta evolução para os estados estacionários, no período transiente a floresta passa por várias configurações de árvores que também podem descrever possíveis estados de uma floresta.

Para melhor caracterizar essas fases, foram estudados histogramas de frequências de classes de árvores por grau de resistência e por idades nos dois estados estacionários e também em configurações transientes. Há um efeito sobre a distribuição etária da floresta em razão da ação de incêndios nos dois estados atratores que o sistema apresenta. Na configuração do estado atrator FD ocorre uma grande diversidade de árvores com diferentes graus de resistência por toda a rede. Na floresta savana observa-se a predominância de árvores jovens e formação de pequenos agregados de árvores que possuem o mesmo grau de resistência, formando bosques de árvores mais resistentes. Os histogramas apresentam um certo padrão de comportamento para cada uma das configurações de evolução da floresta. Em todos os casos para as árvores mais novas há um grande pico, indicando a presença de muitas árvores jovens na rede. Quando as árvores chegam à idade madura, ocorre um patamar para várias classes de idades no histograma com um leve decaimento linear, correspondendo às árvores que resistem por mais tempo ao fogo. Para classes de idades mais avançadas as frequências das árvores decaem rapidamente, devido à diminuição do grau de resistência na senescência.

Também foram estudadas as distribuições de tamanhos de incêndios para os dois estados atratores. O estado S apresenta um comportamento de lei de potência com presença de muitas árvores com resistência mínima, permitindo incêndios em todas as escalas, sobretudo a propagação de grandes incêndios. O estado atrator FD apresenta uma função que indica a presença de um expressivo número de árvores resistentes que contém a propagação de grandes incêndios pela floresta. Desta maneira, a função de distribuição não apresenta um comportamento de lei de potência, apresentando um decaimento do tipo exponencial para grandes incêndios.

De acordo com a variação de parâmetros do modelo, o sistema pode evoluir para as diferentes fases de florestas. Para um valor fixo de T_{vida} e $\tau = 96$, a floresta apresenta-se bastante densa com presença de espaços vazios agrupados e aleatoriamente espalhados pela rede, formando clareiras. Nesse caso, a floresta possui uma diversidade de árvores de diferentes graus de resistência. Para $\tau = 97$ a floresta é densa e com uma grande diversidade de árvores, mas com presença de grandes vazios, apresentando uma densidade

de árvores acima do limiar de percolação. Para $\tau = 98$, a floresta apresenta-se com poucas árvores agrupadas em pequenos bosques distribuídos aleatoriamente, cenário mais próximo de uma savana. Nesse caso, não há uma grande diversidade de árvores com diferentes graus de resistência espalhadas pela floresta, mas apenas em alguns bosques.

O mesmo tipo de comportamento pode ser observado quando se fixa o valor de τ e varia-se o tempo de vida médio de uma espécie, T_{vida} . Nesse caso, observamos que a fase savana é mais estável para valores de T_{vida} menores, evoluindo para a fase FD quando o valor de T_{vida} excede certo limiar. Um esboço de diagrama de fases foi apresentado, mostrando a delimitação das regiões FD e S, no espaço de parâmetros $T_{vida} \times \tau$.

Finalmente concluímos que o ciclo de incêndios tem um papel relevante na estrutura etária das árvores em uma floresta, mesmo quando há apenas uma espécie no ambiente florestal, podendo alterar juntamente com outros fatores intervenientes, o curso de sua evolução temporal da floresta para estados de equilíbrio estacionários bastante distintos.

A inclusão desses fatores no modelo, como ocorrência de pragas, extração da madeira para fins de manejo e etc, assim como a consideração de outras espécies de árvores caracterizadas por seus parâmetros de T_{vida} e τ , poderão ser objeto de futuras investigações.

Referências

- [1] Affonso Guidão Gomes e Maria Cristina Varriale. *Modelagem de Ecossistemas: Uma Introdução*. 2 edição, 2004.
- [2] Chirle Colpini. *Dinâmica e Prognose da produção de uma floresta de contato ombrófila aberta/estacional semidecidual*. Dissertação de Mestrado, Pós Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2008.
- [3] H. T. Odum. *Systems ecology: an introduction*. Wiley, New York, 1983. 644 p.
- [4] Roger Dajoz. *Princípios de Ecologia*. Artmed, 7 edição, 2008.
- [5] José Imaña Encinas et al. *Idade e Crescimento das Árvores*, Dezembro 2005. ISSN 1517-1922.
- [6] Paulo Cesar Botosso e Patrícia Póvoa de Mattos. *Conhecer a Idade das Árvores: Importância e Aplicação*, 2002. ISSN 1517-536X.
- [7] S. W. Taylor e A. L. Carroll. *Disturbance, Forest Age, and Mountain Pine Beetle outbreak Dynamics in BC: A Historical Perspective*. In T. L. Shore, J. E. Brooks, e J. E. Stone, editors, *Mountain Pine Beetle Symposium: Challenges and Solutions*, 2003.
- [8] John White. *Estimating the Age of Large and Veteran Trees in Britain*. *Forestry Commission*, Novembro 1998.
- [9] Victor Johansson, Thomas Ranius, e Tord Snäll. *Epiphyte metapopulation dynamics are explained by species traits, connectivity, and patch dynamics*. *Ecology*, (93):235241, 2012. Apêndice A: Patch characteristics, tree age model, and the lichen survey (Ecological Archives E093-022-A1).

- [10] Hugh J. Barclay, Tina Schivatcheva, e Chao Li. *Equilibrium forest age structure: Simulated effects of random wild fires, fire control, and harvesting*. *BC Journal of Ecosystems and Management*, 10(2):108–115, 2009.
- [11] Ronaldo Vieira Soares e Juliana Ferreira Santos. *Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1994 a 1997*. *Revista Floresta*, 32(2):219–232, 2002.
- [12] Juliana Ferreira Santos, Ronaldo Viana Soares, e Antonio Carlos Batista. *Perfil dos incêndios florestais no Brasil em áreas protegidas no período de 1998 a 2002*. *Revista Floresta*, 36(1), 2006.
- [13] William J. Reed e Kevin S. McKelvey. *Power-law behaviour and parametric models for the size-distribution of forest fires*. *Ecological modelling*, (150):239, 2002.
- [14] C. E. Van-Wagner. *Age-class distribution and the forest fire cycle*. *Canadian Journal of Forest Research*, 8(2):220–227, Março 1978. 10.1139/x78-034.
- [15] Gwynfor D. Richards. *Numerical simulation of forest fires*. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, (25):625633, 1988. doi: 10.1002/nme.1620250222.
- [16] Paulo Roberto Bufacchi Mendes. *Simulação numérica de incêndios de superfície na região amazônica com modelos de turbulência de grandes estruturas*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2014.
- [17] A. L. Sullivan. *Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models*. *International Journal of Wildland Fire*, 18:349-368, 2009. arXiv:0706.3074v1.
- [18] A. L. Sullivan. *A review of wildland fire spread modelling, 1990-present 2: Empirical and quasi-empirical models*. *International Journal of Wildland Fire*, 18:369–386, 2009.
- [19] A.L. Sullivan. *A review of wildland fire spread modelling, 1990-present 3: Mathematical analogues and simulation models*. *International Journal of Wildland Fire*, (18):387–403, 2009. arXiv:0706.4130.
- [20] Maria da Graça de Andrade Oliveira. *Propagação do Fogo e Dinâmicas Florestais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.

- [21] U. Berger e H. Hildenbrandt. *A new approach to spatially explicit modelling of forest dynamics: spacing, ageing and neighbourhood competition of mangrove trees. Ecological Modelling*, 132:287–302, 2000.
- [22] R. A. Monserud. *Evaluating forest models in a sustainable forest management context. USDA Forest Service*, 1:35–47, 2003.
- [23] P.J. Weisberg, F. Bonavia, e H. Bugmann. *Modeling the interacting effects of browsing and shading on mountain forest tree regeneration (Picea abies). Ecological Modelling*, 2005.
- [24] Per Bak, Kan Chen, e Chao Tang. *A forest-fire model and some thoughts on turbulence. Physical Review A*, 147(5,6):297, 1990.
- [25] Per Bak, Chao Tang, e Kurt Wiesenfeld. *Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise. Physical Review Letters*, 59(4):381–384, 1987.
- [26] Per Bak, Chao Tang, e Kurt Wiesenfeld. *Self-Organized Criticality. Physical Review A*, 38(1):364, 1988.
- [27] Michael Creutz. *Cellular Automata and Self Organized Criticality*. Novembro 1996. arXiv:hep-lat/9611017.
- [28] Henrik J. Jensen. *Self-Organized Criticality, Emergent Complex Behaviour in Physical and Biological Systems*. Cambridge University Press, 1998.
- [29] B. Drossel e F. Schwabl. *Self-Organized Critical Forest- Fire Model. Physical Review Letters*, 69(11):1629–1632, 1992.
- [30] Peter Grassberger e Holger Kantz. *On a Forest Fire Model with Supposed Self-Organized Criticality. Journal of Statistical Physics*, 63(3,4):685–700, 1991.
- [31] B. Drossel e F. Schwabl. *Forest- Fire model with immune trees. Physica A*, 199:183–197, 1993.
- [32] Peter Grassberger. *Critical behaviour of the Drossel-Schwabl forest fire model. New Journal of Physics*, 04(17), 2002. doi:10.1088/1367-2630/4/1/317.

- [33] Gunnar Pruessner e Henrik Jeldtoft Jensen. *Broken scaling in the Forest Fire Model*. *Physical Review E*, 65(0567707), 2002.
- [34] G. Camelo-Neto e Sérgio Coutinho. *Cellular Automata Forest Fire Model with Resistant Trees*. *BIOMAT 2006 - International Symposium on Mathematical and Computational Biology*, 2006.
- [35] Ricardo de Sousa Martins, César Eduardo Saez Cuninghant, e Silvio do Lago Pereira. *Autômatos Celulares*. FATEC-SP/APS28 - Inteligência Artificial, 2013.
- [36] Lucas Gremonini e Eduardo Vicentini. *Autômatos Celulares: Revisão bibliográfica e exemplos de implementações*. *Revista Eletrônica Lato Sensu - UNICENTRO*, 2008.
- [37] Gledson Melotti. *Aplicação de Autômatos Celulares em Sistemas Complexos: Um Estudo de Caso em Espalhamento de Epidemias*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, 2009.
- [38] Marcia Luciana Aguenta Castro e Reinado de Oliveira Castro. *Autômatos Celulares: Implementações de Von Neumann, Conway e Wolfram*. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, 3:89–106, 2008.
- [39] Stephen Wolfram. *Cellular automata and complexity: collected papers*. Addison-Wesley, 1994. ISBN: 0201627167.
- [40] Lílian de Oliveira Carneiro. *Simulação de Evacuação de Multidão por Autômatos Celulares Estudo de caso em um estádio de Futebol*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Computação, Universidade Federal do Ceará, 2012.
- [41] Stephen Wolfram. *Cellular Automata as Simple Self-Organizing Systems*. *Publications by Stephen Wolfram*, 1982.
- [42] Stephen Wolfram. *Statistical Mechanics of Cellular Automata*. *Reviews of Modern Physics*, 55(3):603–644, Julho 1983. Melville, NY, USA.
- [43] Stephen Wolfram. *A new Kind of Science*. Wolfram Media Inc, Champaign, II, USA, 2002. 1280 p.

-
- [44] Rita Henriques Flores. *Medida de Complexidade em Autômatos Celulares no Plano*. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Ciências - Formação Contínua de Professores, Universidade do Minho, Dezembro 2012.
- [45] Kelly Cristiane Iarosz. *Autômatos Celulares em Biofísica*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Ciências, Área de concentração - Física, 2013.
- [46] Flávio Luis Cardeal Pádua e Newton José Vieira. *Autômatos Celulares: Teoria e Aplicações*. Programa de Pós Graduação DCC, UFMG, 2004.
- [47] Martin Gardner. *MATHEMATICAL GAMES: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game life*. *Scientific American*, (223):120–123, Outubro 1970.
- [48] Michael G. Simpson. *Plant Systematics*. Elsevier Academic Press, 2006.
- [49] Gustavo Camelo Neto. *Sistemas Complexos Desordenados: Aspectos Dinâmicos e Termodinâmicos*. Tese de Doutorado, Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco, 2003.
- [50] Krzysztof Malarz e Serge Galam. *Square-lattice site percolation at increasing ranges of neighbor bonds*. *Phys. Rev. E*, 71:016–125, Jan 2005. 10.1103/PhysRevE.71.016125, <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.71.016125>.