



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

UM MODELO SIMPLES DE AUTÔMATO CELULAR PARA ESTUDOS DE DINÂMICAS DE VEGETAÇÃO DE ALTO-NÍVEL

Felipe Carvalho de Souza

Willian Vieira de Oliveira

**INPE
São José dos Campos
2019**

1. INTRODUÇÃO

Abdalla et al. (2015) definem modelo como uma abstração de processos reais, que se aproxima do comportamento observado em um sistema, porém, de forma mais simplificada. A necessidade de se modelar a evolução de sistemas reais está presente em diversos contextos, como, por exemplo, na simulação de expansão urbana (MASSABKI et al., 2017), no estudo da propagação de epidemias (MELOTTI, 2009) e na análise da dinâmica de vegetação (ABDALLA et al., 2015). Além desses, pode-se destacar também pesquisas voltadas à análise de sistemas complexos relacionados a ecossistemas, economias, clima, dentre diversos outros.

Dentre as ferramentas matemáticas que podem ser utilizadas para modelagem de sistemas complexos, destaca-se o autômato celular (CA, do inglês, *Cellular Automata*). Esta ferramenta pode ser utilizada para representar diferentes sistemas evolutivos (CASTRO; CASTRO, 2008). A utilização de CA favorece a investigação de processos emergentes que podem ser atribuídos ao comportamento coletivo de um sistema, sendo estes descritos a partir do comportamento individual de cada célula (COLASANTI et al., 2007; WU; DAVID, 2002).

No contexto ambiental, métodos de modelagem baseados em autômatos celulares permitem incorporar às simulações de dinâmicas de vegetação elementos espaciais relacionados, por exemplo, à dispersão e ao estabelecimento de plantas em comunidades naturais (BALZTER et al., 1998; COLASANTI et al., 2007). Estes elementos são essenciais para uma melhor compreensão e representação dos processos que ocorrem em uma comunidade vegetal. Assim, autômatos celulares se destacam por possuírem grande aplicação em investigações de sistemas ambientais (ABDALLA et al., 2015; MONDAL; SOUTHWORTH, 2010).

Colasanti et al. (2007) propuseram um modelo de autômato celular para simulação de dinâmicas de vegetação. Os autores apresentaram um modelo probabilístico de CA que permite reproduzir comportamentos clássicos observados, a nível de comunidade, em ambientes reais. O presente trabalho tem por objetivo implementar e analisar o modelo de CA de dinâmicas de vegetação proposto por COLASANTI et al. (2007), a partir da utilização da plataforma TerraME. Esta plataforma dispõe de um conjunto de ferramentas que permitem o desenvolvimento de modelos que reproduzem o comportamento de processos naturais e sociais (CARNEIRO et al., 2013).

2. AUTÔMATOS CELULARES

Autômatos celulares são ferramentas que permitem representar diversos sistemas reais, baseados em iterações locais dos elementos em análise (CASTRO; CASTRO, 2008). Melotti

(2009) define autômato celular como um sistema discreto, formado por grupos de células às quais são atribuídos estados que variam em instantes de tempo regularmente espaçados. Estas ferramentas são definidas como discretas devido ao fato de os estados das células variarem em instantes de tempo discreto. A cada iteração, os estados das células são alterados a partir de regras de transição que levam em consideração não apenas o estado de cada célula, mas também os estados de sua vizinhança (MELOTTI, 2009; SIRAKOULIS, BANDINI, 2012).

Em geral, autômatos celulares visam descrever sistemas complexos a partir da iteração de células individuais, considerando-se regras simples, sem necessitar da utilização de equações complexas. Para implementação de um CA deve-se atentar a três partes principais: a estrutura que define a geometria/formato da célula, sendo geralmente adotado um formato quadrado (pixels); as regras de vizinhança, onde define-se quais células adjacentes serão consideradas como vizinhas; e as regras de transição local, responsáveis pela atualização das células a cada iteração (MELOTTI, 2009). Além disso, destaca-se a influência da configuração inicial do sistema nos resultados obtidos.

3. MODELO DE AUTÔMATO CELULAR PARA DINÂMICAS DE VEGETAÇÃO

O modelo de autômato celular implementado e analisado neste trabalho foi descrito por Colasanti et al. (2007). No trabalho supracitado, os autores produziram um modelo simples de autômato celular para simulação de dinâmicas de vegetação. Neste modelo, a distribuição dos tipos de vegetação é baseada em uma abordagem probabilística, determinada por regras baseadas em fenômenos como dispersão de sementes, expansão clonal (aumento rápido do número de células) e interações entre plantas adjacentes.

Colasanti et al. (2007) destacam que diversos modelos de CA de vegetação se baseiam em interações pareadas entre plantas individuais para obtenção de elementos dinâmicos que compõem a vegetação. Porém, a imensidão desta tarefa representa um problema, por requerer a avaliação de interações pareadas entre os diversos tipos de vegetação, sob uma ampla variedade de condições ambientais. No modelo proposto, os autores buscam solucionar este problema a partir de uma análise baseada em um número menor de tipos funcionais de plantas (grupos de plantas com funções similares), reduzindo, assim, a dimensionalidade do problema.

No CA desenvolvido, os tipos funcionais de plantas são definidos e classificados a partir da abordagem C-S-R (GRIME, 1977; HODGSON et al., 1999). Esta abordagem leva em consideração fatores que influenciam diretamente na performance das plantas no campo, divididos em dois grupos: estresse, composto por fatores que restringem a produção das plantas;

e, distúrbios, composto por fatores que causam a destruição parcial ou total da biomassa das plantas. O estresse de plantas pode ser relacionado à deficiência de recursos, tais como luz, água e nutrientes, enquanto que os distúrbios podem ser associados à ocorrência de eventos como geadas, queimadas e secas. Estes fatores, combinados, controlam a distribuição dos tipos funcionais de plantas e são utilizados a fim de simular as condições do ambiente simulado.

No modelo proposto, o comportamento das plantas é explicado considerando três processos fisiológicos, relacionados à capacidade das plantas: crescerem colhendo recursos para ganho de biomassa (crescimento vegetativo); sobreviverem a períodos de privação de recursos (resiliência do tecido); e, reproduzirem (fecundidade de sementes). A Tabela 1 apresenta os tipos funcionais considerados neste modelo, bem como as probabilidades adotadas para descrevê-los. Plantas competidoras, por exemplo, apresentam alta probabilidade de crescimento vegetativo aliada a baixas probabilidades de fecundidade de sementes e de sobrevivência sem acesso a recursos.

Tabela 1 – Combinações de atributos de plantas adotados para reproduzir no modelo sete tipos funcionais definidos pelo sistema C-S-R.

Tipo de planta	Crescimento vegetativo	Resiliência do tecido	Fecundidade de sementes
Competidora (C)	1	0	0.2
Tolerante a estresse (S)	0.2	0.95	0.2
Ruderal (R)	0	0	1
Competidora tolerante a estresse (CS)	0.6	0.8	0.2
Ruderal competitiva (CR)	0.6	0	0.6
Ruderal tolerante a estresse (SR)	0.1	0.8	0.6
Tipo funcional CSR (CSR)	0.4	0.75	0.5

Fonte: Colasanti et al. (2007).

No espaço de simulação do CA, os valores atribuídos às células (estados) variam de 1 a 7, representando os tipos de plantas. Além destes, um estado com valor 0 também é considerado, referente a não existência de vegetação. O estado de cada célula é atualizado em tempos discretos (iterações), sendo o novo estado definido a partir do estado atual da célula e do estado das 8 células vizinhas. Os valores da regra de transição do autômato representam probabilidades de mudança de estado, definidas em três vetores, referentes às variáveis: crescimento vegetativo, resiliência do tecido e fecundidade de sementes. Os vetores, com 8 posições cada, são compostos pelos valores descritos na Tabela 1, além de ser atribuído probabilidade 0 para a primeira posição de cada vetor, referindo-se à não existência de vegetação.

O modelo pode ser dividido em duas etapas. Primeiramente, o estado atual de cada célula é sujeito a uma possível perturbação. Em seguida, o modelo simula o crescimento vegetativo das plantas, analisando a possibilidade de uma célula ser ocupada por outra planta, de células vizinhas. Na primeira etapa, caso a planta morra devido a ocorrência de um distúrbio (definido

aleatoriamente), o estado da célula é alterado para zero. Caso contrário, verifica-se também se existem recursos suficientes para manter a planta ou se a resiliência do tecido da planta presente na célula é suficiente para que ela sobreviva. Caso alguma destas condições sejam atendidas, mantem-se o estado atual da célula. Caso contrário, atribui-se estado zero para a célula.

Na segunda etapa, determina-se a probabilidade de um tipo de planta ser substituído por outro. A taxa de crescimento de cada tipo de planta é definida aleatoriamente. Primeiramente, testa-se a possibilidade de ocupação das células por crescimento vegetativo de células vizinhas. Se a taxa de crescimento da planta for inferior à taxa de crescimento vegetativo total das células vizinhas, a célula é ocupada pelo tipo de planta que apresentou a taxa de crescimento superior. Caso esta ocupação não ocorra e o estado da célula seja zero, testa-se a possibilidade de crescimento vegetativo a partir de sementes. Se a taxa de crescimento da planta for inferior à taxa de germinação por sementes das células vizinhas, a célula é ocupada pelo tipo de planta que apresentou a maior taxa de germinação por sementes.

Para ilustrar o comportamento do sistema, dois diferentes cenários foram considerados, simulando ambientes com diferentes probabilidades de ocorrência de distúrbios e de estresse das plantas. A configuração inicial do autômato celular foi definida a partir da distribuição aleatória de uma comunidade composta por 1400 plantas (200 plantas para cada tipo), ao longo do espaço de simulação (64 x 64 pixels). Em cada simulação, 100 iterações foram realizadas.

RESULTADOS

A Figura 1 apresenta os resultados obtidos, em diferentes momentos (t), ao se considerar um ambiente com baixa probabilidade de ocorrência de distúrbios ($D = 9\%$) e alta probabilidade de possuir os recursos requeridos pelas plantas ($R = 90\%$). Neste ambiente, plantas Competidoras, as quais apresentam a maior taxa de crescimento, se sobressaem em relação às demais. Nas condições consideradas, este tipo funcional de planta consegue ocupar rapidamente todo o ambiente. Além disso, dentre os tipos intermediários, o tipo CS, formado a partir dos tipos primários Competidoras e Tolerante a estresse, apresentou melhor desenvolvimento.

Por outro lado, ao aumentar a probabilidade de ocorrência de perturbações e de estresse das plantas por falta de recursos, observa-se uma redução na velocidade de crescimento vegetativo das plantas. A Figura 2 apresenta os resultados obtidos para o segundo cenário. Note que, plantas de tipos intermediários (e.g., CSR, SR) foram dominantes neste ambiente. Neste cenário, o tipo R foi o único tipo funcional primário a apresentar bom desenvolvimento.

Figura 1 – Ambiente de simulação em diferentes momentos/iterações ($D = 0,09$; $R = 0,9$).

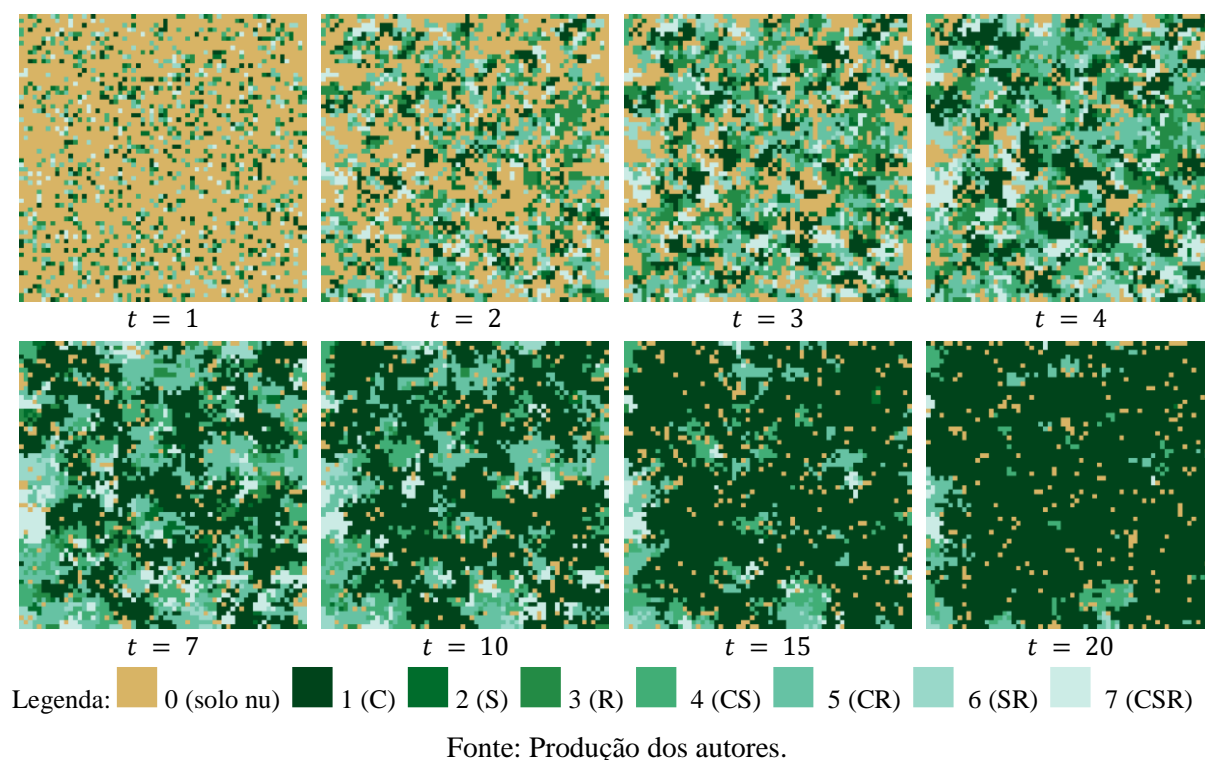
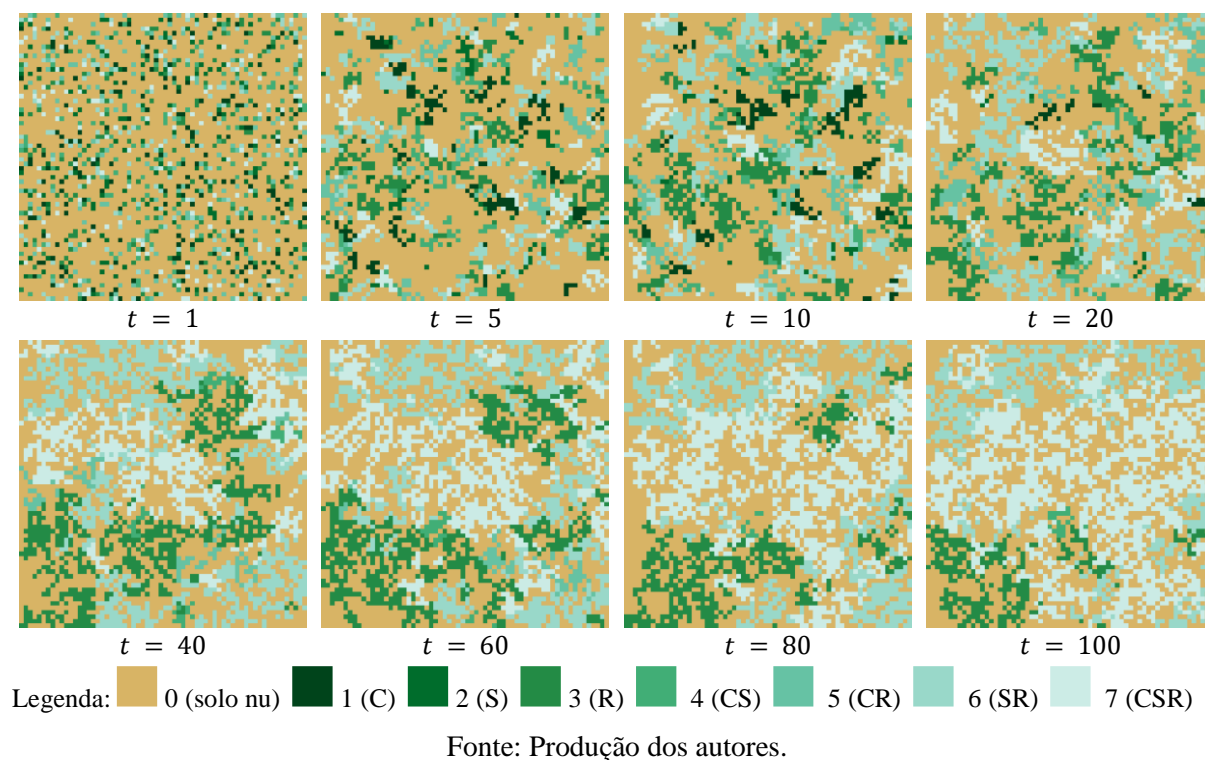


Figura 2 – Ambiente de simulação em diferentes momentos/iterações ($D = 0,36$; $R = 0,7$).



CONSIDERAÇÕES FINAIS

No trabalho realizado por Colasanti et al. (2007), os autores tiveram por objetivo apresentar um modelo de autômato celular que, apesar de simples, pudesse apresentar processos comunitários

de vegetação de alto nível. O modelo apresentado considera um conjunto de regras derivadas de características fisiológicas de tipos funcionais de plantas, definidas pelo sistema C-S-R. O modelo se mostrou capaz de reproduzir dinâmicas observadas a nível de comunidade, mesmo ao se adotar uma análise baseada em tipos funcionais de plantas. O modelo proposto foi avaliado analisando-se a capacidade de desenvolvimento e a diversidade de vegetação em ambientes simulações com diferentes característica, em relação à ocorrência de distúrbios e a presença de recursos necessários para o desenvolvimento da vegetação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, L. S.; OLIVEIRA, L. C.; VOLOTÃO, C. F. S. Modelagem dinâmica da vegetação baseada em autômatos celulares: um estudo de caso da regeneração da Mata Atlântica no distrito de Aldeia Velha – RJ. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 3, p. 669-690, 2015).

BALZTER, H.; BRAUN, P. W.; KOHLER, W. Cellular automata models for vegetation dynamics. **Ecological Modelling**, v. 107, p. 113-125, 1998.

CASTRO, M. L. A.; CASTRO, R. O. Autômatos celulares: implementações de Von Neumann, Conway e Wolfram. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 3, n. 3, p. 89-106, 2008.

CARNEIRO, T. G. S.; ANDRADE, P. R.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; PEREIRA, R. R. Na extensible toolbox for modeling nature-society interactions. **Environmental Modelling & Software**, v. 46, p. 104-117, 2013

COLASANTI, R. L.; HUNT, R.; WATRUD, L. A simple cellular automaton model for high-level vegetation dynamics. **Ecological Modelling**, v. 203, n.3, p. 363-374, 2007.

GRIME, J. P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. **Am. Nat.** v. 111, p. 1169–1194.

HODGSON, J. G.; WILSON, P. J.; HUNT, R.; GRIME, J. P.; THOMPSON, K. Allocating C-S-R plant functional types: a soft approach to a hard problem. **Oikos**, v. 85, p. 282-294, 1999.

MASSABKI, J. A. R.; PEIXOTO, A. S. P.; KAISER, I. M.; MANZATO, G. G. Modelagem dos padrões da expansão urbana da região metropolitana de São Paulo baseada em autômatos celulares **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, n. 1, p. 361-371, 2017.

MELOTTI, G. **Aplicação de autômatos celulares em sistemas complexos: um estudo de caso em espalhamento de epidemias**. 2009. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MONDAL, P.; SOUTHWORTH, J. Evaluation of conservation interventions using a cellular automata-Markov model. **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 1716-1725, 2010.

SIRAKOULIS, G. C.; BANDINI, S. Cellular Automata. In: 10th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, v. 7495, 2012, Santorini Island, Greece. **Proceedings...** 2012.

WU, J.; DAVID, J. L. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. **Ecol. Model.**, v. 153, p. 7-26, 2002.