

Formação de padrões de vegetação através de autômatos celulares

Luiz Dutra^{1*}

¹Departamento de Estatística e Informática Universidade Federal Rural de Pernambuco – Recife, PE – Brasil
*luiz.dutra@ufrpe.br

RESUMO

Padrões formados por vegetações de diversos tipos são um fenômeno importante para a sobrevivência destes organismos, mostrando uma capacidade de auto-organização vantajosa. Este trabalho propõe um modelo de autômato celular para analisar a formação e influência de variáveis no surgimento destes padrões, considerando características da vegetação, solo e clima no conjunto de regras do modelo. Os resultados do autômato celular mostram capacidade de replicar estruturas de vegetação semelhantes a exemplos reais, considerando diferentes relações entre características da vegetação e níveis de precipitação.

Palavras-chave: Autômatos Celulares, Padrões de Vegetação, Auto-Organização, Padrões de Turing

Introdução

Na natureza são observados diversos padrões de vegetação auto-organizada¹. Esses padrões auto-organizados surgem através das relações entre os organismos² e fatores externos como alterações climáticas³ e características do solo⁴.



Figura 1. A imagem mostra uma vegetação do tipo Tiger Bush localizada na Nigéria com vãos em sua estrutura⁵.



Figura 2. A imagem mostra outra vegetação na Nigéria possuindo um padrão de labirinto com pontos¹.

A formação destes padrões é explorada através de abordagens matemáticas como o modelo de Reação-Difusão de Turing¹ e a Teoria do Controle Ótimo⁶. Este trabalho tem como objetivo criar simulações de formação destes padrões através de um Autômato Celular, considerando fatores como a influência de organismos sobre outros, características do solo e principalmente níveis de precipitação.

Metodologia Computacional

Modelagem

Para estabelecer a simulação foi utilizado um Autômato Celular Estocástico Contínuo, com o tamanho de seu espaço definido em $200x200$. Com o objetivo de simular o solo e a vegetação separadamente o autômato possui dois valores de estado. Os estados de vegetação e solo são definidos em valores reais e limitados a partir de parâmetros definidos no modelo, *plant limit* e *soil limit* respectivamente. O estado da vegetação possui intervalo $[0, \infty)$ onde o parâmetro limitador define quando uma célula de vegetação não pode utilizar do solo e aumentar seu valor, um valor de estado igual a zero representa um local sem vegetação, para cada célula de vegetação é denominado um valor de tempo de vida (*lifetime*) em sua criação. O estado do solo possui intervalo $(\infty, \text{soil limit}]$ onde o parâmetro limitador define o valor máximo de uma célula de solo, um valor de solo menor ou igual a zero representa um solo depletado. Para definir um tipo de vegetação e clima específico, o modelo contém outros parâmetros que são utilizados no conjunto de regras do modelo.

- *soil cost*: Custo de solo que denomina a quanto a vegetação utiliza do solo em uma iteração.
- *ne soil scale*: Define a escala de custo de solo para células vizinhas.
- *soil scale*: Valor base utilizado para realizar uma interpolação linear do *soil cost* de acordo com o estado da vegetação.
- *min plant maturity, min soil*: Define o valor mínimo do estado da vegetação da célula e do solo vizinho, respectivamente, para reprodução.
- *rain interval*: Representa o intervalo de iterações entre precipitações.
- *rain amount*: Define a quantidade de precipitação de cada iteração.
- *plant decay, soil decay*: Define a degradação, referente à água, do solo, com e sem vegetação, respectivamente.
- *lifetime μ , lifetime σ* : Utilizados na distribuição do tempo de vida das células.

Regras

O comportamento de cada célula é definido por um conjunto de regras que são aplicadas em toda iteração através dos valores de estados da célula e células vizinhas, que são definidas como toda célula em proximidade imediata, incluindo diagonais.

Para melhor entendimento, o estado da vegetação será representado como *plantState* e o estado do solo como *soilState*. O conjunto de regras é definido em:

1. Toda célula onde *plantState* > 0 e *lifetime* > 0 irá absorver o *soilState* de sua própria célula e de células vizinhas a partir das fórmulas $f(t)$ e $g(t)$, respectivamente:

$$\text{let } t = \text{plantState} / \text{plantLimit}$$

$$f(t) = \text{soilCost} * ((1 - t) * \text{soilScale} + t * 1)$$

$$g(t) = f(t) * \text{neSoilCost}$$

A função $f(t)$ aplica uma interpolação linear, com o objetivo de gerar um viés a favor de células com estado de vegetação maior, gerando competitividade. Na função $g(t)$ é aplicada a escala de custo para solos vizinhos, simulando o quanto eficiente a vegetação é em utilizar do solo vizinho em comparação ao seu⁷.

2. Uma célula que possui vegetação mas o seu *lifetime* $= 0$, seu estado será somado ao estado de solo atual em conformidade com o limite do solo, com o objetivo de preservar a qualidade daquela região enquanto permite a mudança de valor e forma das células vizinhas.

3. A cada iteração é aplicado o *soil decay* ou *plant decay* de acordo com o estado da célula.

4. Após o número de iterações definido em *rainInterval*, a precipitação do período é somada ao estado do solo seguindo:

$$\text{soilState} = \min(\text{soilState} + \text{rainInterval} * \text{rainAmount}, \text{soilLimit})$$

5. A possibilidade de fertilização de um solo sem vegetação é definida por:

$$\text{plantstate}_0 \geq \text{minPlantMaturity}$$

$$\text{soilState}_1 \geq \text{minSoil} \text{ and } \text{plantState}_1 == 0$$

6. Quando um solo é fertilizado seu tempo de vida é definido de maneira pseudoaleatória por uma distribuição normal.

$$\mathcal{N}(\text{lifetime}\mu, \text{lifetime}\sigma^2)$$

Esse tempo de vida determinado de forma pseudoaleatória permite introduzir elementos de imprevisibilidade na auto-organização das células.

Resultados

As simulações foram realizadas com 10000 iterações cada, com uma população de 5 células com *plant state* igual a 0.5 e *lifetime* igual a 10, em posições aleatórias, o valor do estado do solo inicial foi distribuído de maneira aleatória uniforme no intervalo [0.4, 0.6], utilizando a mesma seed do gerador de números pseudoaleatórios com diferentes níveis de decaimento do solo a fim de analisar a formação de diferentes padrões de vegetação de acordo com estas condições. Todas as vegetações de cada simulação possuem as mesmas características e decaimento de solo com vegetação de 0.0002, equivalente à quantidade de precipitação por iteração que possui um intervalo de 400 iterações entre cada precipitação, aplicando o valor acumulado ao solo, como definido na regra 4.

Após realizar as simulações os autômatos tiveram uma formação de padrões similares à vegetações naturais. As células alcançaram padrões como: Vâos em sua estrutura (fig.3), conexões semelhante a um labirinto (fig.4) ou formação de ilhas de vegetação (fig.5). Também é possível observar a progressão da formação destes padrões, por exemplo, a formação da estrutura de labirinto a partir da expansão dos vâos, ao se conectar.

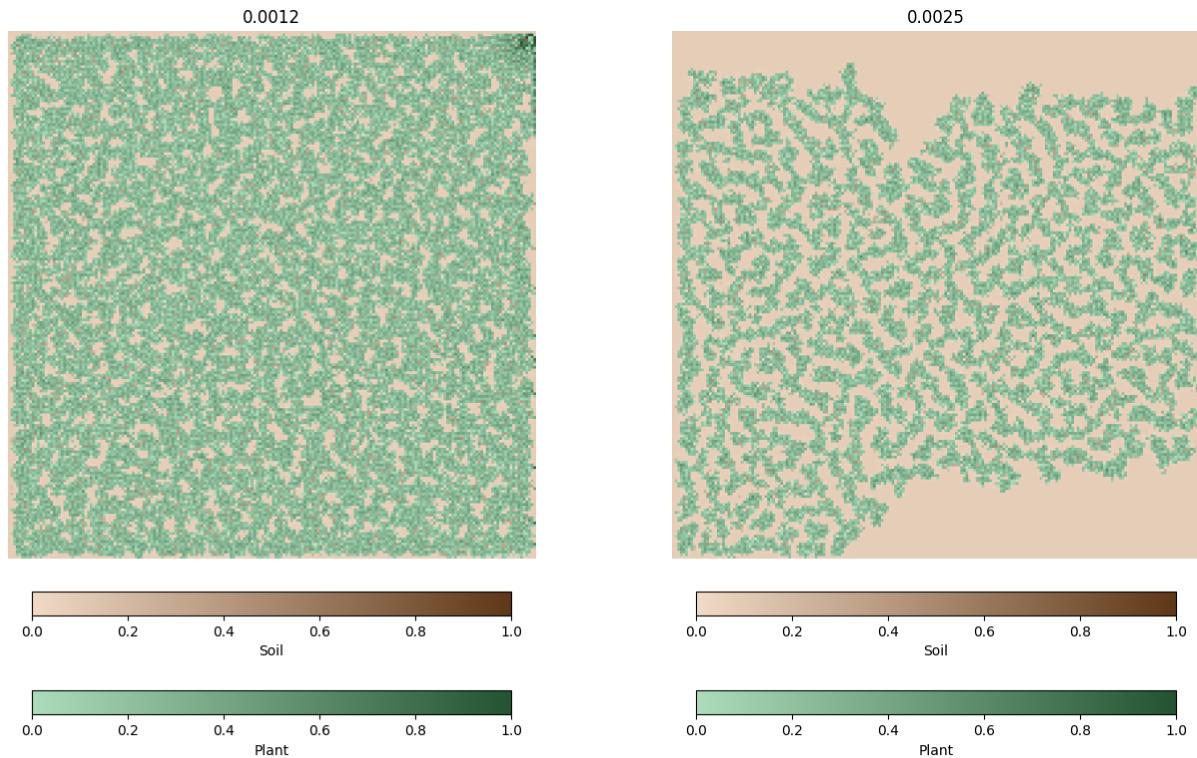


Figura 3. Simulação com decaimento atribuído em 0.0012 com um padrão similar à fig.1.

Figura 4. Simulação com um decaimento maior de 0.0025 com uma formação de labirinto similar à fig.2.

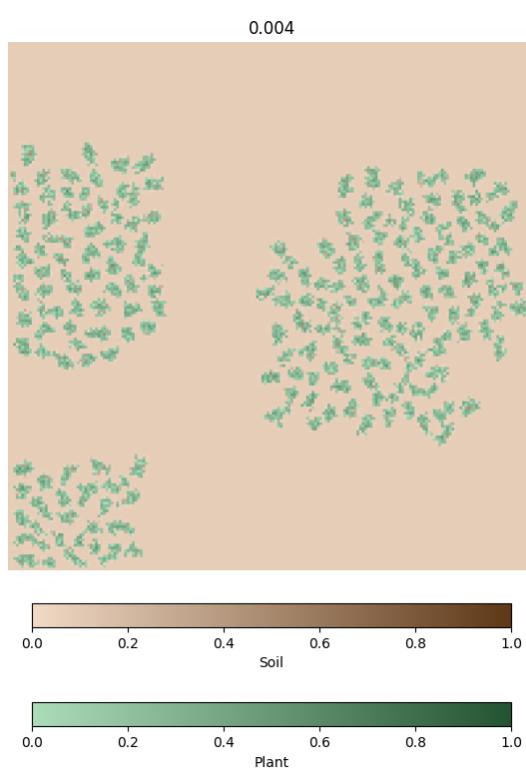


Figura 5. Simulação com decaimento de 0.004 com um padrão de pontos ou ilhas de vegetação.

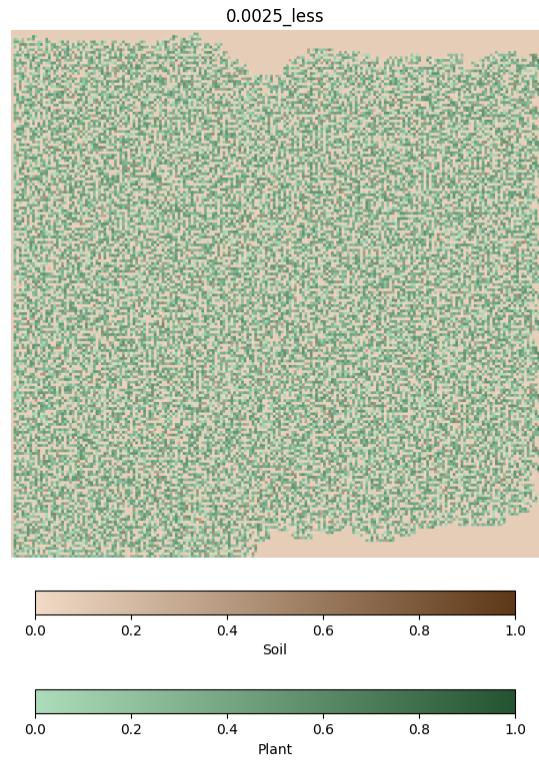


Figura 6. Simulação com uma modificação no parâmetro de *plant limit* de 1 para 0.5, com um decaimento de 0.0025, formando uma vegetação esparsa mas rasa.

Conclusão e Discussão

De acordo com os resultados do modelo, é observável os diferentes comportamentos de acordo com a parametrização, que busca refletir valores com equivalência no mundo real, aplicada.

O fator dominante para influência na formação de uma vegetação de mesmas características foi o decaimento do solo, que em valores maiores representa um clima mais árido com mais perda de água pelo solo; com o aumento deste é possível observar o surgimento de padrões que organizam a vegetação local de forma mais densa, sendo formações vantajosas devido ao potencial de preservar o valor de solo, principalmente influenciados pela regra 2, que permite o retorno de valor de uma vegetação ao solo, e 3, onde o valor de *plant decay* é equivalente ao valor de precipitação, nas simulações, ou menor que o valor de *soil decay*. É demonstrado na diferença dos resultados da fig.4 e fig.6, que a redução do valor máximo do estado da vegetação de uma célula, sem alterar características de solo ou precipitação, permite o maior uso de solo por células vizinhas, permitindo um crescimento de área mais expansivo mas com baixa densidade comparada aos outros padrões.

O uso deste modelo de Autômato Celular permitiu realizar simulações que se assemelham à realidade, com a possibilidade de modificar características da vegetação, solo e precipitação para definir condições específicas que influenciam no surgimento de padrões auto-organizados.

Referências

1. Rietkerk, M. et al. Self organization of vegetation in arid ecosystems. *The Am. Nat.* **160**, 524–530, DOI: [10.1086/342078](https://doi.org/10.1086/342078) (2002). PMID: 18707527, <https://doi.org/10.1086/342078>.
2. Bertolini, C., Cornelissen, B., Capelle, J., van de Koppel, J. & Bouma, T. J. Putting self-organization to the test: labyrinthine patterns as optimal solution for persistence. *Oikos* **128**, 1805–1815, DOI: <https://doi.org/10.1111/oik.06373> (2019). <https://nsojournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/oik.06373>.

3. Meron, E. Pattern formation – a missing link in the study of ecosystem response to environmental changes. *Math. Biosci.* **271**, 1–18, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2015.10.015> (2016).
4. Lejeune, O., Tlidi, M. & Couteron, P. Localized vegetation patches: a self-organized response to resource scarcity. *Phys. Rev. E* **66**, 010901 (2002).
5. Commons, W. File:gapped bush niger nicolas barbier.jpg — wikimedia commons, the free media repository. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Gapped_Bush_Niger_Nicolas_Barbier.jpg&oldid=1085117112 (2025). [Online; accessed 2-February-2026].
6. Hou, L.-F., Li, L., Chang, L., Wang, Z. & Sun, G.-Q. Pattern dynamics of vegetation based on optimal control theory. *Nonlinear Dyn.* **113**, 1–23 (2025).
7. Meron, E. Vegetation pattern formation: The mechanisms behind the forms. *Phys. Today* **72**, 30–36 (2019).

Apêndices

[GitHub](#) possuindo o código fonte, versionamento deste documento e arquivos das simulações